

Schlussbericht

ROMIC-SOLIC

Quantification of Uncertainties in SOLar Induced Climate Variability

Förderkennzeichen: 01 LG 1219

Katja Matthes, Ulrike Langematz, Miriam Sinnhuber,
Blanca Ayarzagüena, Tim Kruschke, Markus Kunze, Lisa Neef, Holger Nieder,
Thomas Reddmann, Stefan Versick

29. September 2017



GEFÖRDERT VOM



Bundesministerium
für Bildung
und Forschung

Inhaltsverzeichnis

1	Kurze Darstellung	3
1.1	Aufgabenstellung	3
1.2	Voraussetzungen, unter denen das Vorhaben durchgeführt wurde	4
1.3	Planung und Ablauf des Vorhabens	4
1.3.1	Arbeits- und Zeitplanung	4
1.3.2	Durchführung	5
1.4	Wissenschaftlicher und technischer Stand, an den angeknüpft wurde	6
1.5	Zusammenarbeit mit anderen Stellen	6
2	Eingehende Darstellung	7
2.1	Verwendung der Zuwendung und des erzielten Ergebnisses im Einzelnen, mit Gegenüberstellung der vorgegebenen Ziele	7
2.1.1	Einleitung	7
2.1.2	Modelle und Experimente	7
2.1.3	Ergebnisse WP1: Repräsentation des solaren Strahlungseinflusses	14
2.1.4	Ergebnisse WP2: Darstellung des auroralen Forcings in medium- top- und high-top-Modellen	21
2.1.5	Ergebnisse WP3: Unsicherheiten im solaren Antrieb	29
2.1.6	Ergebnisse WP4: Relevanz des solaren Signals für dekadische Kli- mavariabilität	37
2.2	Wichtigste Positionen des zahlenmäßigen Nachweises	44
2.3	Notwendigkeit und Angemessenheit der geleisteten Arbeit	44
2.4	Voraussichtlicher Nutzen, insbesondere Verwertbarkeit des Ergebnisses im Sinne des fortgeschriebenen Verwertungsplans	44
2.5	Während der Durchführung des Vorhabens dem ZE bekannt gewordener Fortschritt auf dem Gebiet des Vorhabens bei anderen Stellen	45
2.6	Erfolgte oder geplante Veröffentlichungen des Ergebnisses nach Nr. 11	47

1 Kurze Darstellung

1.1 Aufgabenstellung

Im Rahmen von *SOLIC* ging es um die Quantifizierung von Unsicherheiten in der solaren Variabilität von der unteren Thermosphäre bis zum Ozean. Dies ist insbesondere für verlässliche Klimaprognosen wichtig. Beobachtungs- und Modellstudien deuten auf einen nicht zu vernachlässigenden Beitrag von solar verursachter Variabilität für Klimavariationen hin. Eine Quantifizierung dieses Beitrages ist jedoch schwierig, da es einerseits nur eine begrenzte Anzahl von Beobachtungsdaten gibt und andererseits komplexe Wechselwirkungsmechanismen für den Transfer des solaren Signales von der oberen in die untere Atmosphäre existieren. Die wissenschaftlichen Aktivitäten innerhalb von *SOLIC* beschäftigten sich daher mit einer ganzheitlichen Analyse des Sonnensignales. Die systematischen Untersuchungen konzentrierten sich auf i) die Qualität der in Klima-Chemie-Modellen enthaltenen Strahlungs- und Aurora-Effekte sowie die Dynamik, ii) die Unsicherheiten im 11-jährigen Strahlungsantrieb und iii) die Modellformulierung, insbesondere den Einfluss der Modellhöhe und des Ozeans. Diese Analysen wurden durch einen Vergleich mit anderen, existierenden Simulationen von Klima-Chemie-Modellen sowie gekoppelten Atmosphären-Ozean Modellen ergänzt. Die *SOLIC*-Ziele lehnen sich direkt an die Ziele der internationalen *WCRP/SPARC-SOLARIS/HEPPA*-Initiative an und stellen somit den deutschen Beitrag zu diesem internationalen Vergleichsprojekt dar.

Im Rahmen von *SOLIC* wurden drei verschiedene Klima-Chemie-Modelle mit unterschiedlicher Repräsentation von Strahlung, Dynamik und Chemie und unterschiedlichen Modellhöhen zur Untersuchung der Fragestellungen genutzt. Im Arbeitspaket 1 ging es um den Einfluss des Strahlungsmoduls und insbesondere um die Bestimmung der minimal nötigen Auflösung, um solare Studien durchzuführen. Arbeitspaket 2 beschäftigte sich mit dem Einfluss von geladenen Teilchen. Insbesondere wurde eine Parametrisierung des Aurora-Effektes für Klima-Chemie-Modelle entwickelt, die die Thermosphäre nicht enthalten. Zum Schluss wurde eine Bewertung der Wichtigkeit von Strahlungs- und Teilcheneffekten für das solare Signal durchgeführt. Im Arbeitspaket 3 ging es um die Sensitivität des atmosphärischen Signals auf unterschiedliche spektrale solare Einstrahlungsdaten sowie um den Effekt von hoher und geringer geomagnetischer Aktivität. Hier wurden verschiedene Sensitivitätsstudien durchgeführt, die für die Bewertung der Wichtigkeit von Strahlungs- und Teilchenprozessen verwendet wurden. Im Arbeitspaket 4 ging es schließlich um die Untersuchung des dynamischen Transfers des solaren Signales (Strahlungs- und Teilcheneffekt) von der Hochatmosphäre bis zum Ozean. Gezielte Sensitivitätsstudien sollten den Einfluss des stratosphärischen „top-down“- und des troposphärisch-ozeanischen „bottom-up“-Prozesses untersuchen und mit existierenden Klima-Chemie-Modellstudien im Rahmen von *WCRP-SPARC* und Simulationen mit gekoppelten Atmosphären-Ozean-Modellen aus der fünften Phase des *Coupled Model Intercomparison Project (CMIP5)* vergleichen, um eine Einschätzung und Empfehlung für verbesserte Prognosen in zukünftigen IPCC-Berichten geben zu können.

1.2 Voraussetzungen, unter denen das Vorhaben durchgeführt wurde

Bisher fehlte eine Quantifizierung des solaren Signals durch den stratosphärischen „top-down“- und den troposphärisch-ozeanischen „bottom-up“-Mechanismus zur natürlichen dekadischen Klimavariabilität. Insbesondere die relative Bedeutung und Genauigkeit der Antriebsdaten sowohl für Strahlungs- als auch Teilchenprozesse (Aurora), die minimal erforderliche Auflösung im kurzwelligen Strahlungsschema der Klimamodelle, die Modellhöhe zur Berücksichtigung von Teilcheneffekten sowie die Repräsentation von dynamischen Prozessen in der Atmosphäre aber auch die Wechselwirkung mit dem Ozean waren nur ansatzweise bekannt. Daher wurde ein Erkenntnisgewinn der Ergebnisse von *SOLIC* für die langfristige Klimamodellierung und -vorhersagen z.B. im Rahmen von zukünftigen IPCC-Berichten erwartet.

1.3 Planung und Ablauf des Vorhabens

Zugrunde liegt der überarbeitete Meilensteinplan aus dem Zwischenbericht 2014.

1.3.1 Arbeits- und Zeitplanung

Im Folgenden sind die Arbeitspakete und Meilensteine des Antrages aufgelistet, zu denen dann im Ergebnisteil jeweils kurz Stellung genommen und die wichtigsten Ergebnisse zusammengefasst werden.

Arbeitspakete und Meilensteine:

- Arbeitspaket (WP) 1: Repräsentation des solaren Strahlungseinflusses
 - M1-1: Bereitstellung eines verbesserten Strahlungsschemas *FUBRad3*
 - M1-2: *FUBRad3*-Berechnungen (offline) und Validation mit „Line-by-Line“-Rechnungen
 - M1-3: *FUBRad3*-Berechnungen (offline) mit verschiedenen spektralen Auflösungen
 - M1-4: CCM-Simulationen mit verschiedenen spektralen Auflösungen und entsprechende Empfehlung
- Arbeitspaket (WP) 2: Repräsentation der Auroraaktivität
 - M2-1: Bereitstellung der Ergebnisse aus Sensitivitätssimulationen mit *3dCTM* (im Antrag *EMAC/CMAT*, siehe Modellbeschreibungen)
 - M2-2: Bereitstellung der Parametrisierung von mesosphärischem auroralen NO_x
 - M2-3: Analyse des Aurorasignals und Vergleich Strahlungs- vs. Partikeleffekt

- Arbeitspaket (WP) 3: Unsicherheiten des solaren Antriebs
 - M3-1: Ergebnisse Strahlungsrechnungen für Referenzantrieb im solaren Minimum
 - M3-2: Ergebnisse Sensitivitäts-Strahlungsrechnungen für verschiedene spektrale Strahlungsantriebe
 - M3-3: Photolyseraten und ihre Abhängigkeit vom solaren Antrieb
 - M3-4: CCM-Referenzsimulationen (Zeitscheiben) für solares und aurorales Minimum
 - M3-5: CCM-Zeitscheibensimulationen für solares Maximum und aurorales Minimum
 - M3-6: CCM-Zeitscheibensimulationen für solares Maximum und aurorales Maximum
 - M3-7: Analyse der Bedeutung von Strahlungs- und Chemieeffekten
- Arbeitspaket (WP) 4: Relevanz des solaren Signals für dekadische Klimavariabilität
 - M4-1: Analyse des dynamischen Transfers des solaren Signals
 - M4-2: Vergleich mit *SPARC CCMVal*-Simulationen
 - M4-3: Analyse und Vergleich des dynamischen Transfers des solaren Signals in *CMIP5*-Simulationen
 - M4-4: Empfehlungen hinsichtlich Berücksichtigung von Strahlungs- und Partikeleffekten in Klimastudien
 - M4-5: Transiente CCM-Simulationen mit UV- und Auroraaantrieb („top-down“)
 - M4-6: Transiente CCM-Simulationen mit TSI/VIS-Antrieb („bottom-up“)
 - M4-7: Transiente CCM-Simulationen bei solarem Antrieb mit voller solarer Variabilität
 - M4-8: Analyse der Relevanz von „top-down“- vs. „bottom-up“-Mechanismus

1.3.2 Durchführung

In *SOLIC* waren insgesamt vier Postdoktoranden und, mit einem geringen Anteil an Stunden, eine Gruppenleiterin angestellt (FUB: 15.6.2014–31.03.2017; GEOMAR: 01.01.2015–30.06.2017; KIT: 15.08.2014–31.03.2017, mit einer Unterbrechung in 2016). Der Postdoktorand am GEOMAR war während der Projektlaufzeit zweimal in Elternzeit, nämlich vom 06.03.–05.08.2015 (davon vom 06.05.–05.07.2015 in Teilzeit (50%) arbeitend) sowie vom 08.12.2016–07.08.2017. Um eine planmäßige Fortführung und Fertigstellung der *SOLIC*-Arbeiten zu gewährleisten, wurde zunächst eine kostenneutrale Verlängerung für alle drei Partner (KIT und FUB: 31.03.2017, GEOMAR: 30.06.2017) beantragt und am GEOMAR verschiedene Elternzeitvertretungen realisiert (siehe Details im Erfolgskontrollbericht GEOMAR). Der am KIT angestellte Postdoktorand hat

das Projekt auf eigenen Wunsch zum 30.09.2016 vorzeitig verlassen. Um die noch offenen Arbeiten zu Ende zu führen, wurden ein bereits am KIT angestellter Postdoktorand sowie die Gruppenleiterin mit einem Teil ihrer Arbeitszeit im Zeitraum 01/2017–03/2017 im Projekt beschäftigt. Trotz der teils unterschiedlichen Anfangs- und Endvertragslaufzeiten der aus *SOLIC* finanzierten Mitarbeiter, konnten alle im Projektantrag genannten Meilensteine erreicht werden, wie weiter unten detaillierter erläutert.

1.4 Wissenschaftlicher und technischer Stand, an den angeknüpft wurde

Zu Beginn des Projektes gab es einen Datensatz für die solare, spektral aufgelöste Einstrahlung (spectral solar irradiance, SSI) und die totale solare Einstrahlung (total solar irradiance, TSI), der zur Vorgabe der solaren Strahlungsvariabilität für *CMIP5* empfohlen wurde und bisher von allen Klimamodellen in internationalen Modellvergleichsstudien verwendet wurde (*NRLSSI1*; Lean et al. (2005)). Daneben gab es eine Reihe von anderen Rekonstruktionen der spektralen, solaren Variabilität, die zum Teil sehr widersprüchlich waren (Ermolli et al., 2013). Außerdem war unklar, welche minimale Auflösung das kurzwellige Strahlungsschema in den Klimamodellen besitzen muss, um die wellenlängenabhängige Variabilität der Sonnenstrahlung richtig zu repräsentieren. Die früheren Vorgaben für *CMIP5* beinhalteten keine Teilcheneffekte (Aurora, solare Protonen, Elektronen, Kosmische Strahlung), da ihr Effekt für Klimasignale zu Beginn von *SOLIC* nur unzureichend untersucht war, gerade auch in Relation zu den Strahlungseffekten.

Zu Beginn des Projektes gab es viele Studien, die sich mit dem stratosphärischen „top-down“-Mechanismus beschäftigten und nur wenige Studien, die auch den troposphärisch-ozeanischen „bottom-up“-Mechanismus und hier insbesondere die Rolle des Ozeans betrachteten. Anknüpfend an die erste Veröffentlichung des kombinierten Effektes aus „top-down“- und „bottom-up“-Effekten von (Meehl et al., 2009), wurde in *SOLIC* nun erstmalig und konsistent in einem Modellsystem die relative Bedeutung beider Effekte untersucht. Ein weiterer Punkt war die Wichtigkeit der Wechselwirkungen mit dem Ozean, die zu Projektbeginn gerade in Beobachtungen und in vereinfachten Modellstudien veröffentlicht waren (Gray et al., 2013; Scaife et al., 2013), woraus sich abzeichnete, dass diese gerade für die dekadische Klimavariabilität eine sehr wichtige Rolle spielen.

1.5 Zusammenarbeit mit anderen Stellen

Im Rahmen von *SOLIC* wurde hinsichtlich der Weiterentwicklung des Modellsystems *EMAC/EDITH* und bei der Durchführung der Line-by-Line-Rechnungen (LbL) eng mit dem Projekt *ROMIC-MesoEnergy* zusammengearbeitet. Die Erstellung des solaren Antriebsdatensatzes für *CMIP6* erfolgte in enger Kooperation mit dem internationalen *WCRP/SPARC-SOLARIS/HEPPA*-Projekt (Matthes et al., 2017). Insbesondere für die Entwicklung der oberen Randbedingung (UBC: upper boundary condition), um Teilcheneffekte auch in „medium-top“-Modellen (Modelloberrand in 80km Höhe) zu repräsentieren, gab es eine enge Zusammenarbeit mit Dr. Bernd Funke vom *Instituto de*

Astrofísica de Andalucía (IAA-CSIC) in Granada (Spanien), die nun auch in die Erstellung der solaren Antriebsdaten für *CMIP6* eingeflossen ist.

Um eine verbesserte Repräsentation dynamischer Signale im *CESM1(WACCM)*-Modell zu gewährleisten, wurden in enger Kooperation mit dem *National Center for Atmospheric Research* (NCAR) in Boulder/CO, USA (A. Smith) eine modifizierte Schwerewellenparameterisierung sowie ein modifizierter Vertikaltransport von der Thermo- in die Mesosphäre realisiert. Die im Rahmen von *SOLIC* entwickelte Parametrisierung der Ionisationsraten nach dem Kp-Index ist nun Teil des *MESSy*-Submodels *SPE*, die im Rahmen von *SOLIC* entwickelten bzw. getesteten Parametrisierungen der auroralen NO_y -Produktion und des auroralen NO_y -Gehaltes in der Mesosphäre sind Teil des neu entwickelten *MESSy*-Submodels *UBCNOx*. Die im Rahmen von *SOLIC* eingeführte Aktualisierung des *MESSy*-Submoduls *RAD/FUBRAD* ist Teil der aktuellen *EMAC*-Release. *UBCNOx* sowie die aktualisierten Submodule *SPE* und *RAD/FUBRAD* stehen mit Veröffentlichung der *EMAC* Version 2.53.0 durch den Koordinator des *EMAC*-Projektes, P. Jöckel, DLR Oberpfaffenhofen, seit Februar 2017 allen *EMAC*-Benutzern zur freien Verfügung.

2 Eingehende Darstellung

2.1 Verwendung der Zuwendung und des erzielten Ergebnisses im Einzelnen, mit Gegenüberstellung der vorgegebenen Ziele

2.1.1 Einleitung

Im Folgenden werden zunächst die verwendeten Klima-Chemie-Modelle mit ihren jeweiligen Besonderheiten beschrieben, bevor im Anschluss eine Übersicht über die in *SOLIC* durchgeführten Modellexperimente gegeben wird. Anschließend wird zu den oben aufgelisteten Arbeitspaketen und Meilensteinen des Antrags jeweils Stellung genommen und die wichtigsten erzielten Ergebnisse zusammengefasst.

2.1.2 Modelle und Experimente

Modellbeschreibungen

CESM1(WACCM) Das *Whole Atmosphere Community Climate Model* (*WACCM4*; Marsh et al., 2013) ist ein im Rahmen des *Community Earth System Model* (*CESM* 1.0.6; Hurrell et al., 2013) zur Verfügung stehendes Atmosphärenmodell, welches als sog. „high-Top“ Model sämtliche Atmosphärenschichten von der Erdoberfläche bis in die untere Thermosphäre (bis $5 \cdot 10^{-6}$ hPa \sim 140 km) abdeckt. Es wurde als Erweiterung zum *Community Atmospheric Model* (*CAM4*; Neale et al., 2013) mit all seinen physikalischen Parametrisierungen entwickelt. Für alle in *SOLIC* durchgeführten Simulationen wurde *CESM1(WACCM)* mit einer horizontalen Auflösung von $1,9^\circ$ geographischer Breite und $2,5^\circ$ geographischer

Länge und 66 Schichten in der Vertikalen verwendet. Für die Berücksichtigung chemischer Prozesse der mittleren Atmosphäre beinhaltet *CESM1(WACCM)* das *MOZART3*-Modul (*Model for Ozone and Related Chemical Tracers*; Kinnison et al., 2007). Dieses repräsentiert alle Mitglieder der O_x^- , NO_x^- , HO_x^- , ClO_x^- und BrO_x^- -Gruppen, die troposphärischen Quellen für N_2O , H_2O und CH_4 sowie FCKWs und andere halogene Verbindungen (insgesamt 59 Spezies und 217 chemische Gas-Phasen-Reaktionen). Das Photolyseschema arbeitet mit einer spektralen Auflösung von 100 Banden im Bereich des sichtbaren und UV-Lichts (121–750 nm). Das Modul für kurzwellige Strahlung stellt eine Kombination verschiedener Parametrisierungen dar: oberhalb von ca. 70 km entspricht die spektrale Auflösung des Strahlungsschemas dem der Photolyse (erweitert um die auf dem solaren Radioflussindex basierende Parametrisierung von Solomon und Qian (2005) zur Berücksichtigung der EUV-Strahlung); unterhalb von ca. 60 km wurde das *CAM4*-Schema für kurzwellige Strahlung beibehalten, welches 19 spektrale Banden über den Bereich von 200 bis 5000 nm nutzt (Collins, 1998); kurzwellige Erwärmungsraten im Übergangsbereich zwischen 60 und 70 km werden als gewichtete Mittel der beiden Ansätze berechnet. Im Bereich der tropischen Stratosphäre ermöglicht *CESM1(WACCM)* das Vorschreiben äquatorialer Winde gemäß einer beobachteten oder idealisierten *Quasi-Biennalen Oszillation (QBO)* (Matthes et al., 2010).

Für die Simulationen zur Quantifizierung des Auroraeffekts (siehe M2-3 und M3-6) wurde eine leicht abgeänderte Modellversion von *CESM1(WACCM)* eingesetzt, welche wir im Folgenden als *WACCM(S15mod)* abkürzen. Kollegen vom *National Center for Atmospheric Research (NCAR)* in den USA stellten uns Änderungen am Modellcode zur Verfügung, welche (i) die Umwandlung dissipierender Schwerewellen in Wärme verringern und somit die Temperatur und mittelbar die Ozonkonzentrationen insbesondere in der Mesosphäre beeinflussen und (ii) den Diffusionskoeffizienten erhöhen, so dass eine stärkere Wärmediffusion die Mesosphäre zusätzlich abkühlt, dabei aber gleichzeitig auch der (vertikale) Transport von Spurengasen verstärkt wird (Smith et al., 2015). Insbesondere diese zweite Änderung war für *ROMIC-SOLIC* von Interesse, da damit der abwärtige Transport von durch Auroraeffekte produziertem NO_x am Winterpol verbessert (verstärkt) werden sollte, was dann zu verstärkter katalytischer Ozonzerstörung in der Stratosphäre führen sollte. Für die Experimente in WP4 (siehe nächster Abschn., Tab. 2 und Abschn. 2.1.6 wurde eine Konfiguration von *CESM1(WACCM)* mit einem voll gekoppelten Ozeanmodell, dem *Los Alamos National Laboratory Parallel Ocean Program (POP2)* (Smith et al., 2010), genutzt.

EMAC Das *ECHAM/MESSy Atmospheric Chemistry (EMAC)* Modell ist ein Klima-Chemie-Modell (Chemistry Climate Model, CCM), das Module zur Beschreibung von troposphärischen und mittelatmosphärischen Prozessen und deren Interaktion mit dem Ozean, den Landoberflächen und anthropogenen Einflüssen enthält (Jöckel et al., 2010). Es verwendet die zweite Version des modularen Erd-Submodellsystems (*Modular Earth Submodel System, MESSy2*), um Software-Codes

verschiedener Institute zu verbinden. Das atmosphärische Basismodell ist das Europäische Zentrum Hamburg Allgemeine Zirkulationsmodell in der 5. Generation (*European Centre Hamburg general circulation model, ECHAM5*, Roeckner et al., 2006). Für das Projekt *SOLIC* wurde *EMAC* (*ECHAM5* Version 5.3.02, *MESSy* Version 2.51, Jöckel et al., 2016) in einer Auflösung von T42L47MA verwendet. Das entspricht etwa einem Gaußschen Gitter mit ungefähr $2.8 \times 2.8^\circ$ und 47 hybriden Flächen in der Vertikalen bis in eine Höhe von 0.01 hPa (80 km), einem sogenannten „medium-top“-Modell. Für die in *SOLIC* durchgeführten Simulationen wichtige Submodelle sind: *MECCA*, *JVAL*, *RAD/RAD-FUBRAD*, und *QBO*. *MECCA* (*Module Efficiently Calculating the Chemistry of the Atmosphere*; Sander et al., 2011a) modelliert die chemischen Prozesse in der Atmosphäre und *JVAL* (Sander et al., 2014) die Photolyseraten, auf der Basis von nach *JPL* (Sander et al., 2011b) aktualisierten Ratenkoeffizienten, mit einer spektralen Auflösung von 9 Banden von 121–682,5 nm, wobei das Schumann-Runge Kontinuum von 122–178,6 nm nicht enthalten ist (siehe Tab. 1). Mit *RAD/RAD-FUBRAD* (Dietmüller et al., 2016) wird die Parametrisierung des Strahlungstransfers nach Fouquart und Bonnel (1980) und (Roeckner et al., 2003) angebunden. Für eine genauere Auflösung des spektralen Bandes im Bereich der ultravioletten und sichtbaren Wellenlängen (UV-VIS) wird das *RAD-FUBRAD* für Druckflächen kleiner als 70 hPa in der Stratosphäre und Mesosphäre verwendet, wobei die Auflösung im Bereich UV-VIS von einem auf 57 Bänder erhöht wurde (Tabelle 1) (Nissen et al., 2007; Kunze et al., 2014). Im Submodell *QBO* wird der zonale Wind der unteren Stratosphäre in der Nähe des Äquators zu den beobachteten zonalen Winden hin relaxiert (Giorgetta und Bengtsson, 1999). Um den auroralen Einfluss in der Mesosphäre in *EMAC* berücksichtigen zu können, wurde im Rahmen des Projektes (siehe Ergebnisse von WP2 in Abschnitt 2.1.4) das Submodul *UBCNOx* entwickelt (*EMAC/UBCmod*). Dieses enthält eine Randbedingung für das aurorale NO_y in der Mesosphäre im polaren Winter, basierend auf Beobachtungen des MIPAS-Instrumentes (Funke et al., 2016), die in WP2 (M2-2, M2-3) und WP3 (M3-4 und M3-6) zur Anwendung kommt. Für die transienten Simulationen (WP4) wird die Atmosphären-Ozeanversion von *EMAC*, *EMAC-MPIOM*, eingesetzt (Pozzer et al., 2011). In dieser Version wurde das MPIOM (*Max Planck Institute Ocean Model*; Marsland et al., 2003; Jungclaus et al., 2006) unter Verwendung der *MESSy*-Schnittstelle an das Atmosphärenmodell gekoppelt. Hinzu kommen noch die Submodelle *HD* (Hagemann et al., 2006) für den hydrologischen Abfluss und *A2O* (Pozzer et al., 2011) für die dynamische Kopplung der Atmosphäre an den Ozean. *MPIOM* wird mit der Auflösung GR15L40 betrieben, entsprechend einer ungefähren Gitterweite von $1.5 \times 1.5^\circ$ und 40 Schichten.

EMAC/EDITH ist eine am KIT entwickelte Erweiterung des *EMAC*-Models in die untere Thermosphäre ($3e^{-5}$ Pa, etwa 220 km, also ein „high-top“-Modell). Diese wurde anders als im Antrag genannt, anstelle von *EMAC/CMAT* verwendet, da die Kopplung des Modellsystems *EMAC* mit dem Thermosphären-Ionosphären-Modell *CMAT* zu unlösbaren strukturellen Problemen in den Windfeldern in der

Kopplungsregion (Mesosphäre) geführt hat. Da die primitiven Gleichungen der Aerodynamik oberhalb der Exobase ($\approx 300\text{--}400\text{ km}$) nicht mehr angewendet werden können, wurde *EMAC* erstmal nur bis 220 km erweitert. Für unsere Zwecke wurde dies als ausreichend erachtet, da der aurorale Bereich von $90\text{--}200\text{ km}$, mit einem maximalen Einfluss in der unteren Thermosphäre in $105\text{--}115\text{ km}$, damit abgedeckt ist. Die verwendete Auflösung ist T42L74; von den 74 Höhengschichten liegen 29 in der Thermosphäre oberhalb von 1 Pa . Die vertikale Auflösung ist am höchsten in der Troposphäre und untersten Stratosphäre, darüber ist die Auflösung konstant. Vom Boden bis 10 hPa ist *EMAC/EDITH* gröber aufgelöst als die im Projekt verwendete L47-Version des “medium-top“-Modells *EMAC*, darüber feiner. Die verwendete *EMAC*-Auflösung hat eine kontinuierlich schlechter werdende vertikale Auflösung, die am oberen Rand ($0,01\text{ hPa}$) etwa 7 km beträgt, während *EMAC/EDITH* zwischen 10 hPa und der Mesopause eine Auflösung von im Mittel 2 km besitzt. Über die Erweiterung des Höhenbereiches hinaus wurden molekulare und turbulente Diffusion, Joule-Heizen, Ionendrag und eine erweiterte Beschreibung der Strahlungsheizung- und -kühlung implementiert. Der Einfluss von auroralem Forcing wird durch eine Parametrisierung der Ionisationsraten nach dem geomagnetischen Kp-Index berücksichtigt, die in diesem Projekt entwickelt wurde (siehe Ergebnisse von WP2 in Abschnitt 2.1.4). Photoionisationsraten werden durch die Parametrisierung von Solomon und Qian (2005) zur Verfügung gestellt. Der Einfluss der Ionenchemie auf die neutrale Chemie wird durch die Parametrisierung von Nieder et al. (2014) berücksichtigt. Ebenfalls implementiert wurde ein Modul, welches das Himmelsleuchten in der oberen Mesosphäre und unteren Thermosphäre beschreibt (Projekt *ROMIC-MesoEnergy*).

3dCTM Für die Sensitivitätsstudien in WP2 wurde abweichend zum ursprünglichen Antrag zusätzlich 3dCTM verwendet. 3dCTM ist ein Chemie-Transportmodell der Stratosphäre, Mesosphäre und unteren Thermosphäre, welches den Höhenbereich von etwa 10 bis etwa 140 km mit einer Auflösung von $1\text{--}3\text{ km}$ überdeckt. Die horizontale Auflösung beträgt $2.5^\circ \times 3.75^\circ$. Temperaturen und Windfelder werden aus Ergebnissen des *LIMA*-Modells vorgeschrieben (Berger, 2008). Das Modell enthält eine detaillierte Beschreibung der neutralen Chemie der Stratosphäre, Mesosphäre und unteren Thermosphäre; der Beitrag der Ionenchemie wird durch die Parametrisierung von Nieder et al. (2014) beschrieben. Die Ionisation durch präzipitierende Teilchen wird entweder durch das *AIMOS*-Modell (Wissing und Kallenrode, 2009) oder durch die im Rahmen des Projektes entwickelte Parametrisierung (siehe Abschnitt 2.1.4) vorgegeben. Zusätzlich wird Photoionisation berücksichtigt (Solomon und Qian, 2005). 3dCTM berechnet Photolyseraten im Wellenlängenbereich von $121\text{--}800\text{ nm}$ mit einer Auflösung von 1 nm im Bereich der Schumann-Runge Banden, die ins Infrarot bis zu 3 nm zunimmt. Heizraten werden nicht berechnet, da Temperatur und Windfelder vorgegeben werden. Eine detailliertere Beschreibung von 3dCTM findet sich in Sinnhuber et al. (2012, 2017).

Modellexperimente Insgesamt wurden im Rahmen von *ROMIC-SOLIC* 20 verschiedene Zeitscheiben-Experimente (konstante externe Antriebe) und 4 verschiedene transiente Experimente, jedes davon für mehrere Jahrzehnte jeweils mit zwei bzw. drei komplexen Klima-Chemie-Modellen integriert. Hinzu kommen 168 Sensitivitätsexperimente über jeweils einen Modellmonat (siehe Tab. 2). Dies entspricht insgesamt ca. 3500 simulierten Modelljahren. Hinzu kommen offline-Kalkulationen mit dem *RAD/FUBRAD-MBM*-Schema für kurzwellige Strahlung für 85 verschiedene spektrale Auflösungen (s. Tabelle 3). Für die Evaluation der verbesserten Heizratenparametrisierungen wurden zahlreiche höchstauflösende *Line-by-line*-Rechnungen (LbL) für verschiedene Atmosphärenprofile (hohe/niedrige Breiten, Sommer-/Wintersituation, unterschiedliche Sonnenzenitwinkel) durchgeführt.

Tabelle 1: Zusammenfassung der spektralen Auflösung der Parametrisierungen der kurzwelligen Erwärmungsraten und der Photolyseraten in *EMAC/EMAC-EDITH* und *CESM1(WACCM)*. Angegeben sind die Grenzen der spektralen Intervalle und die weitere Verfeinerung in Klammern, wenn die Auflösung größer als eins ist. Angepasst aus Matthes et al. (2017).

Spektrale Region	Gase	<i>CESM1(WACCM)</i>	<i>EMAC/EMAC-EDITH</i>
kurzwellige Erwärmungsraten ^{*, +}			
Lyman- α	O ₂		[121-122]
Schumann-Runge Kontinuum	O ₂		[125-175] (3)
Schumann-Runge Banden	O ₂		[175-205]
Herzberg Kont./Hartley Banden	O ₂ , O ₃	[200-245]	[206.5-243.5] (15)
Hartley Banden	O ₃	[245-275] (2)	[243.5-277.5] (10)
Huggins Banden	O ₃	[275-350] (4)	[277.5-362.5] (18)
UV-A/Chappuis Banden	O ₃	[350-700] (2)	[362.5-690] (58)
Nahes Infrarot/Infrarot	O ₂ , O ₃ , CO ₂ , H ₂ O	[700-5000] (10)	[690-4000] (3)
Photolyse			
Lyman- α		[121-122]	[121-122]
Schumann-Runge Kontinuum		[122-178.6] (20)	
Schumann-Runge Banden		[178.6-200] (12)	[178.6-202]
Herzberg Kont./Hartley Banden		[200-241] (15)	[202-241]
Hartley Banden		[241-291] (14)	[241-289.9]
Huggins Banden		[291-305.5] (4)	[289.9-305.5]
UV-B		[305.5-314.5] (3)	[305.5-313.5]
UV-B/UV-A		[314.5-337.5] (5)	[313.5-337.5]
UV-A/Chappuis Banden		[337.5-420] (17)	[337.5-422.5]
Chappuis Banden		[420-700] (9)	[422.5-682.5]

^{*} Zu beachten ist, dass die angegebene Auflösung bei *CESM1(WACCM)* nur unterhalb von ~ 65 km gültig ist. Die Auflösung für die kurzwelligen Erwärmungsraten oberhalb von ~ 65 km entspricht der Auflösung für die Photolyseraten.

⁺ Zu beachten ist, dass die angegebene Auflösung im Bereich 121–690 nm bei *EMAC/EMAC-EDITH* nur für Druckflächen mit einem Druck kleiner als 70 hPa gültig ist. Bei Druckflächen mit einem Druck oberhalb von 70 hPa gibt es nur ein Band von 250–690 nm.

Tabelle 2: Übersicht der im Rahmen von *ROMIC-SOLIC* durchgeführten Modellsimulationen; offline-Kalkulationen mit *RAD/FUBRAD-MBM* und LbL-Rechnungen für analoge Strahlungsantriebe sind mit ⁺ bzw * gekennzeichnet

Typ	Experimentname	verw. Modelle	Meilenstein
Zeitscheibe	solminATL3 ⁺ *	WACCM, EMAC	M3-4, M3-7, M4-1
	solminATL3aurlow	WACCM(S15mod), EMAC/UBCmod, EMAC/EDITH	M2-3, M3-4, M3-7, M4-1
	solminATL3aurhigh	WACCM(S15mod), EMAC/UBCmod, EMAC/EDITH	M2-3, M3-6, M3-7, M4-1
	solmaxNRLSSI1 ⁺	WACCM, EMAC	M3-5, M3-7, M4-1
	solmaxNRLSSI2 ⁺	WACCM, EMAC	M3-5, M3-7, M4-1
	solmaxSATIRET ⁺	WACCM, EMAC	M3-5, M3-7, M4-1
	solmaxSATIRES ⁺	WACCM, EMAC	M3-5, M3-7, M4-1
	solmaxCMIP6 ⁺	WACCM, EMAC	M3-5, M3-7, M4-1
	solmaxCMIP6aurhigh	EMAC/EDITH	M2-3, M3-6
	solmaxCMIP6aurlow	EMAC/EDITH	M2-3, M3-6
	solminNRLSSI1(abs) ⁺	WACCM, EMAC	M4-4
	solminNRLSSI2(abs) ⁺	WACCM, EMAC	M4-4
	solminSATIRET(abs) ⁺	WACCM, EMAC	M4-4
	solminSATIRES(abs) ⁺	WACCM, EMAC	M4-4
	solminCMIP6(abs) ⁺	WACCM, EMAC	M4-4
	solmaxNRLSSI1(abs) ⁺	WACCM, EMAC	M4-4
	solmaxNRLSSI2(abs) ⁺	WACCM, EMAC	M4-4
	solmaxSATIRET(abs) ⁺	WACCM, EMAC	M4-4
	solmaxSATIRES(abs) ⁺	WACCM, EMAC	M4-4
	solmaxCMIP6(abs) ⁺	WACCM, EMAC	M4-4
transient	fulltransient	WACCM, EMAC	M4-7, M4-8
	topdown	WACCM, EMAC	M4-5, M4-8
	bottomup	WACCM, EMAC	M4-6, M4-8
	Sensitivitätsexp. 2002-2010	3dCTM	M2-1, M2-2
		EMAC/UBCmod, 3dCTM	M2-3

2.1.3 Ergebnisse WP1: Repräsentation des solaren Strahlungseinflusses

Für die Durchführung der Untersuchungen in diesem Arbeitspaket war die Entwicklung der offline-Version des *FUBRAD*-Strahlungscode erforderlich. Da die online-Version in den *MESSy*-Rahmen eingebettet ist, welches für dieses Projekt mit dem globalen, allgemeinen Zirkulationsmodell *EMAC*, wurde die offline-Version *RAD* als *MESSy*-Basismodell realisiert. Dabei wurden die *MESSy*-Module *AEROPT* und *CLOUDOPT* mit integriert, wodurch auch offline Strahlungsberechnungen mit vorgeschriebenen Aerosolen und/oder Wolken möglich sind. Es ist geplant, die Ergebnisse dieses Arbeitspakets zeitnah für eine Veröffentlichung aufzubereiten (Kunze et al., in Planung).

M1-1 Bereitstellung eines verbesserten Strahlungsschemas Nach der Umsetzung der technischen Voraussetzungen durch die Erstellung des offline-Basismodells *RAD/FUBRAD-MBM* wurde der Strahlungscode des *FUBRAD* um weitere Parametrisierungen der Erwärmungsraten im Bereich der Schumann-Runge Banden (SRB) (175-205 nm) von Koppers und Murtagh (1996) (KM96) (17 Banden) und Kockarts (1994) (16 Banden) erweitert. Neben diesen neu implementierten Parametrisierungen wurde auch die bereits vorhandene Parametrisierung nach Strobel (1978) (1 Band) in einer abgeänderten Form mit erhöhter spektraler Auflösung in das aktualisierte *FUBRAD* implementiert (Strobel-R19) (19 Banden).

M1-2 Verifizierung der Erwärmungsraten aus *RAD/FUBRAD-MBM* mit den Line-by-Line Berechnungen des KIT Das LbL-Strahlungsmodell, das am KIT betrieben wird, dient als Referenz für den Vergleich der verschiedenen Parametrisierungen für die SRB-Erwärmungsraten. Die KM96-Parameterisierung zeigt eine relativ große Abhängigkeit der Erwärmungsraten von den vorherrschenden Zenitwinkeln, die dazu führt, dass bei großem Zenitwinkel die Erwärmungsraten in der Mesosphäre im Vergleich zur LbL-Referenz unterschätzt werden (Abb. 1a) und bei kleinem Zenitwinkel in der oberen Mesosphäre zu hohe Erwärmungsraten auftreten (Abb 1c). Der direkte Vergleich zeigt, dass die SRB-Parametrisierung nach Strobel (1978) im Vergleich zur LbL-Referenz die SRB-Erwärmungsraten gut repräsentiert. Eine leichte Verbesserung kann in einigen Bereichen durch Verwendung der Strobel-R19 mit höherer Auflösung erreicht werden. Der Vergleich der implementierten SRB-Parametrisierungen mit der LbL-Referenz zeigt, dass in der Strobel-R19 SRB-Parametrisierung (Strobel, 1978) die geringsten Fehler auftreten. Durch die Möglichkeit bei der Strobel-R19 Version auf die bisher implementierte Skalierung für die Einstrahlung im solaren Maximum und Minimum verzichten zu können, stellt die Strobel-R19 SRB-Parametrisierung die beste Alternative für die weitere Verwendung in *EMAC* dar. Die *EMAC*-Simulationen, die im Rahmen von *SOLIC* in den anderen Arbeitspaketen durchgeführt wurden, verwenden die 106-Banden-Variante von *FUBRAD* (Kunze et al., 2014) inklusive der SRB-Parametrisierung nach Strobel (1978) mit einem SRB-Band. Die ersten *EMAC*-Simulationen wurden bereits vor Abschluss der Untersuchungen in WP1 gestartet. Aus Gründen der Konsistenz wurden auch die weiteren *EMAC*-Simulationen mit dieser *FUBRAD*-Variante durchgeführt.

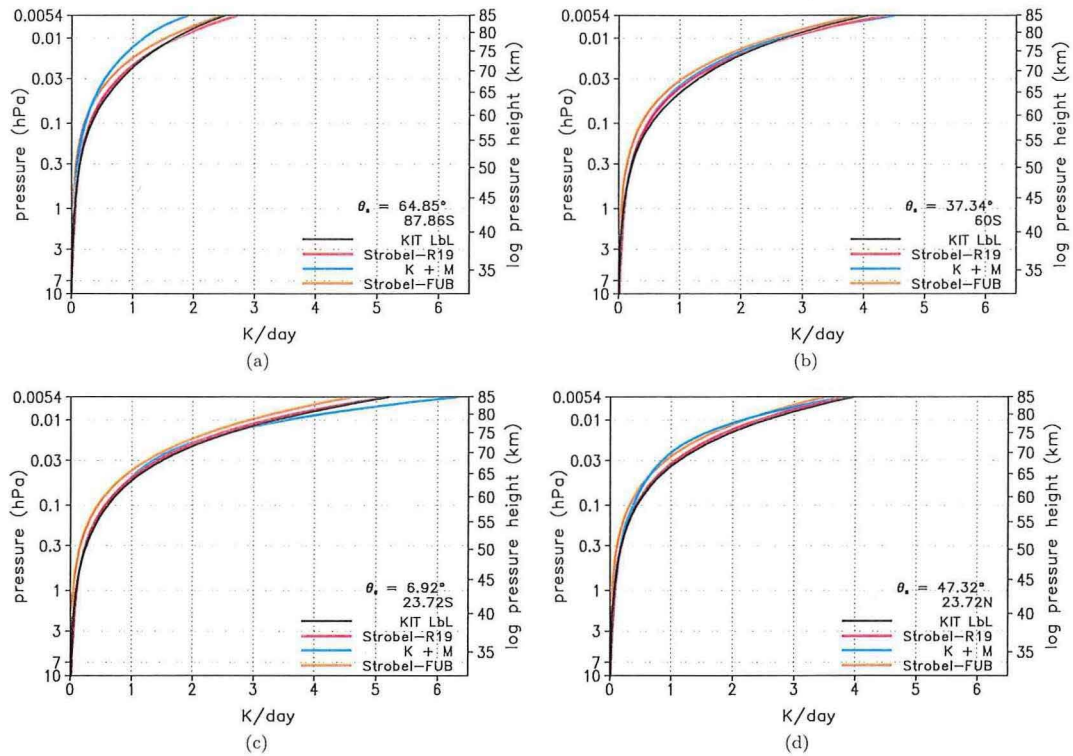


Abbildung 1: Erwärmungsraten in den Schumann-Runge Banden bei Verwendung der *ATLAS3-SSI* für den 1. Januar, 13:00 Uhr für das LbL-Referenzmodell (KIT LbL) (schwarz), Strobel (1978) R19 (rot), Koppers und Murtagh (1996) (blau) und Strobel (1978) (orange); (a) in der Nähe des Südpols (87,9°S), (b) 60°S, (c) 23,7°S, (d) 23,7°N.

M1-3 Berechnungen mit RAD/FUBRAD-MBM zur Ableitung des solaren Signals in Abhängigkeit der spektralen Auflösung Eine Vergleichsstudie von Klima-Chemie-Modellen (SPARC CCMVal, 2010) hat aufgezeigt, dass die Ausprägung des solaren Signals in Modellstudien auch von der spektralen Auflösung der verwendeten Parametrisierung der kurzwelligen solaren Einstrahlung abhängig ist. Das *RAD/FUBRAD* hat eine besonders hohe Auflösung im Bereich der UV-Strahlung, die in der Mesosphäre und Stratosphäre vor allem von molekularem Sauerstoff und Ozon absorbiert wird (206,5–690 nm). Die zuletzt vorgenommene Erhöhung der spektralen Auflösung von 49 auf wahlweise 55 oder 106 Banden (Kunze et al., 2014), war für die Umsetzung eines konsistenten Strahlungsflussprofils mit realistischen Strahlungsflüssen, besonders an der Meeresoberfläche, erforderlich. Die Verwendung eines skalierten Strahlungsflusses für die Chappuis-Bande, wie in der 49 Banden Version von Nissen et al. (2007) praktiziert, ist damit nicht mehr erforderlich und die Koppelung von *EMAC* an den interaktiven Ozean *MPIOM* ist auch bei Verwendung des *RAD/FUBRAD* möglich.

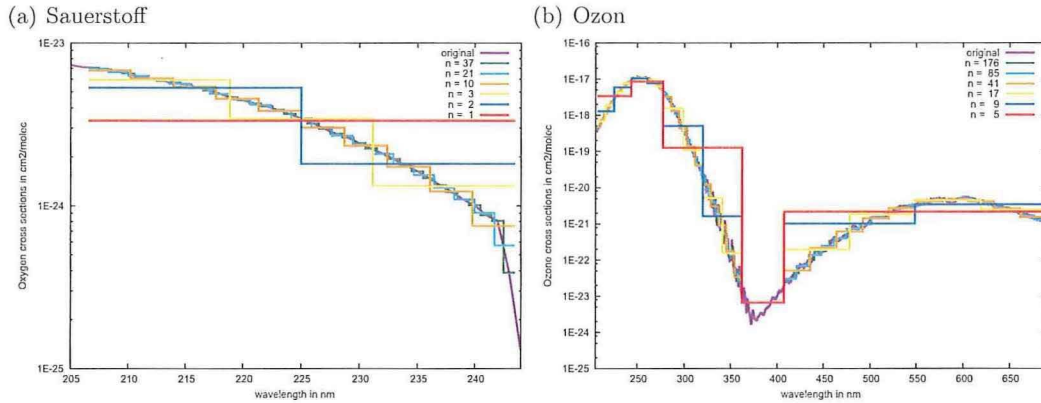


Abbildung 2: Absorptionsquerschnitte für (a) Sauerstoff im Bereich des Herzberg-Kontinuums (Fally et al., 2000; Yoshino et al., 1988) und (b) Ozon von 205–690 nm (Brion et al., 1998; Malicet et al., 1995), dargestellt in der originalen Auflösung (blau) und gemittelt für verschiedene spektrale Auflösungen zur Verwendung in *FUBRAD*.

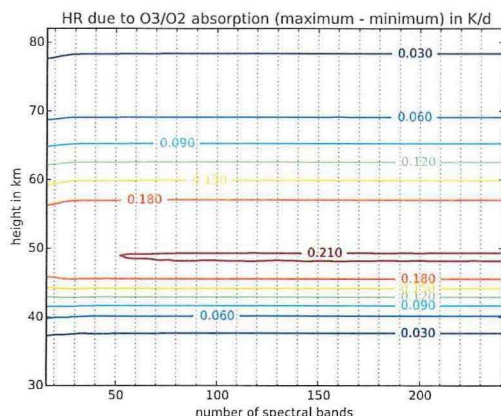
Die Untersuchungen für M1-3 beschränken sich auf den Spektralbereich 206,5–690 nm und beinhalten somit nicht die Erwärmungsraten, die durch noch kurzwelligere Strahlung bei Lyman- α , dem Schumann–Runge Kontinuum und den Schumann–Runge Banden hervorgerufen werden. Bei der abschließenden Angabe der minimalen spektralen Auflösung, die für die Modellierung des solaren Signals mit *FUBRAD* erforderlich ist, müssen 5 bzw. 23 Banden (je nachdem ob die Strobel, 1978, SRB-Parametrisierung mit einem Band oder 19 Banden verwendet wird) zusätzlich berücksichtigt werden, die den Spektralbereich von 121–205 nm abdecken.

Für die Durchführung der *RAD/FUBRAD-MBM* Simulationen mit sukzessive verfeinerter Auflösung im Spektralbereich von 206,5–690 nm mussten die Absorptionsquerschnitte von Ozon für das Herzberg-Kontinuum und die Hartley-, Huggins- und Chappuis-Banden (206,5–690 nm) (Brion et al., 1998; Malicet et al., 1995), sowie die Absorptionsquerschnitte von Sauerstoff für das Herzberg-Kontinuum (206,5–243,5 nm) (Fally et al., 2000; Yoshino et al., 1988) für verschiedene spektrale Auflösungen gemittelt werden. Die originalen Absorptionsquerschnitte und die resultierenden, gemittelten Absorptionsquerschnitte für beispielhaft ausgesuchte spektrale Auflösungen sind in Abbildung 2 dargestellt. Die minimale spektrale Auflösung, vier absorbierende Banden zwischen 206,5–690 nm und ein nicht absorbierendes Band von 362,5–407,5 nm, orientiert sich an der Implementierung der Parametrisierung in *FUBRAD*, bei der die Strahlungsflüsse in vier physikalisch sinnvolle Bereiche unterteilt sind: Herzberg-Kontinuum (206,5–243,5 nm), Hartley-Bande (243,5–277,5 nm), Huggins-Bande (277,5–362,5 nm) und Chappuis-Bande (407,5–690 nm).

Die Erwärmungsraten von 362,5–407,5 nm werden, aufgrund der sehr geringen Ozon-Absorptionsquerschnitte in diesem Bereich (siehe Abb. 2b), vernachlässigt. Dennoch wird dieser Bereich bei der spektralen Auflösung mitberücksichtigt, da der Strahlungsfluss in diesem Bereich nicht vernachlässigt werden darf. Als feinste spektrale Auflösung in den Bereichen Herzberg, Hartley und Huggins ist eine Bandbreite von 1 nm möglich. Für die Chappuis-Bande wurde die feinste Auflösung auf eine Bandbreite von 3,2 nm beschränkt. Die spektrale Auflösung wurde sukzessive um jeweils eine Bande in den vier Spektralbereichen erhöht, angefangen bei vier absorbierenden Banden bis zur jeweils möglichen feinsten Auflösung in den vier Spektralbereichen mit 37 Banden in Herzberg, 34 in Hartley, 85 in Huggins und 85 in den Chappuis Banden. Die Offline-Kalkulation mit der größten spektralen Auflösung hat damit 241 absorbierende Banden. Insgesamt sind offline Kalkulationen mit 85 verschiedenen spektralen Auflösungen durchgeführt worden (s. Tabelle 3). Es zeigt sich, dass die Berechnungen mit den geringen Auflösungen (4, 8, 12) zu keinen befriedigenden Ergebnissen für den Referenzzustand führen, wenn man die hier durchgeführte Methodik anwendet, da die berechneten Erwärmungsraten unrealistisch hohe Werte aufweisen (nicht gezeigt). Parametrisierungen mit dieser geringen Auflösung erfordern eine sorgfältige Skalierung der Absorptionsquerschnitte oder der Strahlungsflüsse, wie sie z.B. bei Shine und Rickaby (1989) vorgenommen wurden. Mit Hilfe dieser Skalierungen ist es dann möglich die kurzwelligen Erwärmungsraten realistisch zu modellieren, die Ausprägung des solaren Signals wird dabei aber deutlich unterschätzt (Nissen et al., 2007).

Das solare Signal der kurzwelligen Erwärmungsraten (in K/Tag) im Spektralbereich von 206,5–690 nm ist in Abbildung 3a dargestellt in Abhängigkeit von der spektralen Auflösung der *FUBRAD*-Strahlungsparametrisierung im dargestellten Spektralbereich (Herzberg-Kontinuum, Hartley-, Huggins- und Chappuis-Banden). Eine Zunahme des solaren Signals der Erwärmungsraten ist nur für die spektralen Auflösungen unterhalb von etwa 56 Banden festzustellen, wobei die größte Zunahme zwischen den spektralen Auflösungen 16 bis 30 stattfindet. Das wird auch anhand der Abbildung 3b deutlich, die den prozentualen Fehler in Abhängigkeit von der spektralen Auflösung darstellt. Der angegebene Fehler bezieht sich auf das solare Signal der Simulation mit der höchsten angewendeten spektralen Auflösung (241 absorbierende Banden). Im Höhenbereich der maximalen kurzwelligen Erwärmungsraten zwischen 50 und 60 km zeigt sich ein maximaler Fehler von etwas mehr als 4% bei einer spektralen Auflösung von 16 Banden im Vergleich zur Simulation mit 241 Banden. Im Höhenbereich von 30 bis 42 km treten bei den spektralen Auflösungen unterhalb von 30 Banden deutlich größere Fehler auf, die allerdings teilweise auch negativ sind. Zurückzuführen ist dies auf nicht ausreichend skalierte Absorptionsquerschnitte bei den Simulationen mit relativ geringer spektraler Auflösung.

(a) solares Signal



(b) Fehler in %

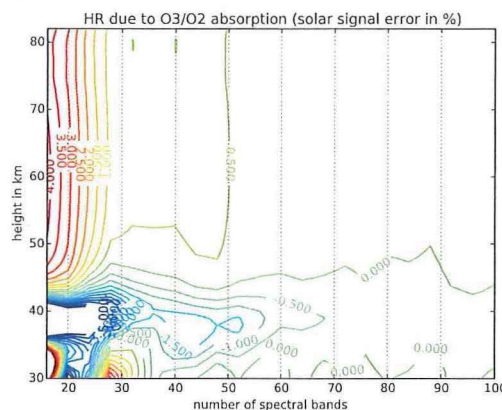


Abbildung 3: (a) Solares Signal der Erwärmungsraten im Wellenlängenbereich von 206,5–690 nm für das Herzberg Kontinuum, die Hartley-, Huggins- und Chappuis-Banden für Januar in der Nähe des Südpols für einen Höhenbereich von 30 bis 82 km. Das solare Signal ist dargestellt in Abhängigkeit von der spektralen Auflösung (16–241 absorbierende Banden). (b) Prozentualer Fehler des in (a) dargestellten solaren Signals bezogen auf das Signal der Simulation mit der höchsten verwendeten Auflösung in Abhängigkeit von der spektralen Auflösung für 16–100 absorbierende Banden (Hinweis: der Fehler der spektralen Auflösungen 104–241 ist nicht dargestellt).

M1-4 Abgeben einer Empfehlung über die minimale spektrale Auflösung für die Ableitung des vollständigen solaren Signals Die Ergebnisse aus M1-3 haben gezeigt, dass bei der *FUBRAD*-Parametrisierung der kurzwelligen Erwärmungsraten in der Stratosphäre und Mesosphäre, die hauptsächlich durch die Absorption von UV-Strahlung durch Ozon in der Stratosphäre und unteren Mesosphäre hervorgerufen werden, die weitere Erhöhung der Auflösung auf mehr als 56 Banden keine wesentliche Steigerung des solaren Signals zu erzielen ist. Durch die Vorgabe der spektralen solaren Einstrahlung ist *FUBRAD* grundlegend besser geeignet das solare Signal in den kurzwelligen Erwärmungsraten darzustellen als die Originalstrahlungsparametrisierung von *ECHAM5* (Fouquart und Bonnel, 1980), die nur die Vorgabe der TSI ermöglicht (Nissen et al., 2007).

Auf der Grundlage der für M1-3 erstellten offline-Kalkulationen kann für *FUBRAD* die minimale spektrale Auflösung für verschiedene, noch zu tolerierende Fehler festgelegt werden. Die Fehlerangaben, die in der letzten Spalte der Tabelle 3 angegeben sind, beziehen sich auf eine Höhe von 55 km, in der die größten Erwärmungsraten auftreten. Es ergeben sich damit die folgenden Empfehlungen für die minimale spektrale Auflösung im Bereich von 206,5–690 nm in Abhängigkeit des zu tolerierenden Fehlers für das solare Signal:

- 56 Banden (Fehler $\sim 0,2\%$);
- 40 Banden (Fehler $\sim 0,54\%$);
- 28 Banden (Fehler $\sim 0,73\%$).

Die Parametrisierung der kurzwelligen Strahlung sollte mindestens 28 Banden besitzen, wenn der Fehler des solaren Signals die Grenze von 1% nicht überschreiten soll. Ergänzt um die Banden des Spektralbereichs 121–205 nm ergibt sich eine minimale spektrale Auflösung für *FUBRAD* von 33 bzw. 51 Banden (bei Verwendung der Strobel (1978) SRB-Parametrisierung mit 19 Banden). Die hier durchgeführten Untersuchungen mit *FUBRAD* sind gültig für diese Parametrisierung, die durch die Vernachlässigung der Rayleigh-Streuung und der damit zu erreichenden Effizienz besonders gut für hohe spektrale Auflösungen geeignet ist. Eine allgemeingültige Empfehlung für die minimale spektrale Auflösung der Parametrisierung kurzwelliger Strahlung in Klimamodellen ist auf Basis der hier durchgeführten Untersuchungen allerdings nicht zu treffen. Das in *SOLIC* verwendete *CESM1(WACCM)* zeigt mit einer spektralen Auflösung von 19 Banden ebenfalls ein gut ausgeprägtes solares Signal. Weitere Untersuchungen mit anderen Parametrisierungen der kurzwelligen solaren Strahlung sind erforderlich, um zu einer allgemeingültigen Aussage zu kommen.

Tabelle 3: Aufstellung der mit *RAD/FUBRAD-MBM* durchgeführten offline Kalkulationen. Der angegebene Fehler gibt die prozentuale Abweichung der einzelnen Berechnungen in 55 km Höhe in der Nähe des Südpols in Bezug auf die Berechnung Nr. 85 an.

Nr.	Auflösung (gesamt)	Herzberg	Hartley	Huggins	Chappuis	Fehler bei 55 km in %
1	4	1	1	1	1	n.a.
2	8	2	2	2	2	n.a.
3	12	3	3	3	3	n.a.
4	16	4	4	4	4	4,134
5	20	5	5	5	5	3,103
6	24	6	6	6	6	1,843
7	28	7	7	7	7	0,726
8	32	8	8	8	8	0,556
9	36	9	9	9	9	0,549
10	40	10	10	10	10	0,538
11	44	11	11	11	11	0,613
12	48	12	12	12	12	0,605
13	52	13	13	13	13	0,390
14	56	14	14	14	14	0,213
15	60	15	15	15	15	0,182
16	64	16	16	16	16	0,186
17	68	17	17	17	17	0,148
...	
34	136	34	34	34	34	0,01
35	139	35	34	35	35	0,004
36	142	36	34	36	36	-0,021
37	145	37	34	37	37	-0,004
38	147	37	34	38	38	0,006
...	
85	241	37	34	85	85	0,0

2.1.4 Ergebnisse WP2: Darstellung des auroralen Forcings in medium-top- und high-top-Modellen

In diesem Arbeitspaket wird die Darstellung von auroralem Forcing in Klima-Chemie-Modellen untersucht. Dafür wurden Parametrisierungen entwickelt, um das aurorale Forcing in „high-top“-Modellen und „medium-top“-Modellen zu beschreiben. Dies ist insbesondere für „medium-top“-Modelle wie *EMAC* von Bedeutung, da deren oberer Rand unterhalb der Aurora ($\approx 90\text{--}200\text{ km}$, Maximum in $\approx 105\text{--}115\text{ km}$) liegt. Auf Messungen beruhende Ionisationsraten (*AIMOS*-Modell, Wissing und Kallenrode, 2009) wurden in einem transienten Lauf des „high-top“-Modells *3dCTM* getestet. Aus diesen Ionisationsraten wurde eine Parametrisierung der Ionisationsraten für „high-top“-Modelle wie *EMAC/EDITH* erstellt, die die Ionisation durch präzipitierende aurorale Elektronen in der Mesosphäre und Thermosphäre in Abhängigkeit vom Kp-Index beschreibt. Mit dieser Parameterisierung wurden Sensitivitätsstudien für verschieden hohes aurorales Forcing mit dem „high-top“-Modell *3dCTM* durchgeführt. Aus den Ergebnissen dieser Sensitivitätsstudien wurde eine Parameterisierung für aurorales NO_x in der Mesosphäre für „medium-top“-Modelle erstellt. Mit diesen Parameterisierungen für high-top und „medium-top“-Modelle sowie mit einer weiteren, auf Messungen von auroralem NO_y basierenden, Parameterisierung für „medium-top“-Modelle wurden Testläufe mit vorgeschriebener Dynamik im Zeitraum 2002–2010 durchgeführt, um das so modellierte NO_y mit Messungen zu vergleichen. Um den Einfluss von auroralem Forcing auf die atmosphärische Zusammensetzung und Dynamik zu untersuchen, wurden transiente Modellläufe mit dem „medium-top“-Modell *EMAC* sowie Zeitscheibenexperimente mit hohem und niedrigem auroralen Forcing mit *CESM1(WACCM)*, *EMAC/EDITH* und *EMAC* durchgeführt (siehe Abschn. 2.1.5, M3-4 und M3-6).

Die Struktur orientiert sich im Folgenden an der Numerierung der Meilensteine, nicht an der logischen Reihenfolge des Vorgehens, die bei diesem Arbeitspaket an einer Stelle abweicht: der erste Teil von M2-2 musste vor Bearbeitung von M2-1 fertig gestellt werden.

Parametrisierungen des auroralen Forcings: Vorbereitende Studien Zur Vorbereitung der Sensitivitätsstudien mit hoher/niedriger geomagnetischer Aktivität und als Test der Ionisationsraten wurde ein transienter Lauf mit *3dCTM* für den Zeitraum 2002–2010 mit vorgeschriebener Dynamik durchgeführt. Das Forcing wurde vorgegeben durch Ionisationsraten von Protonen und Elektronen aus dem *AIMOS*-Modell (Wissing und Kallenrode, 2009), welche auf gemessenen Teilchenflüssen basieren. Die Modellergebnisse wurden mit Messungen des *MIPAS*-Instrumentes in der Mesosphäre und Stratosphäre verglichen. Es ergibt sich eine qualitativ gute Übereinstimmung in hohen Breiten insbesondere in der Südhemisphäre und in dynamisch ruhigen Wintern der Nordhemisphäre; die Bildung von NO_y durch das aurorale Forcing wird vom Modell qualitativ richtig wiedergegeben. Ein detaillierter quantitativer Vergleich der Modellergebnisse mit Messungen findet sich in Sinnhuber et al. (2017). Auf Basis dieser Ergebnisse wurde entschieden, die *AIMOS*-Ionisationsraten als Grundlage für die Parametrisierung der

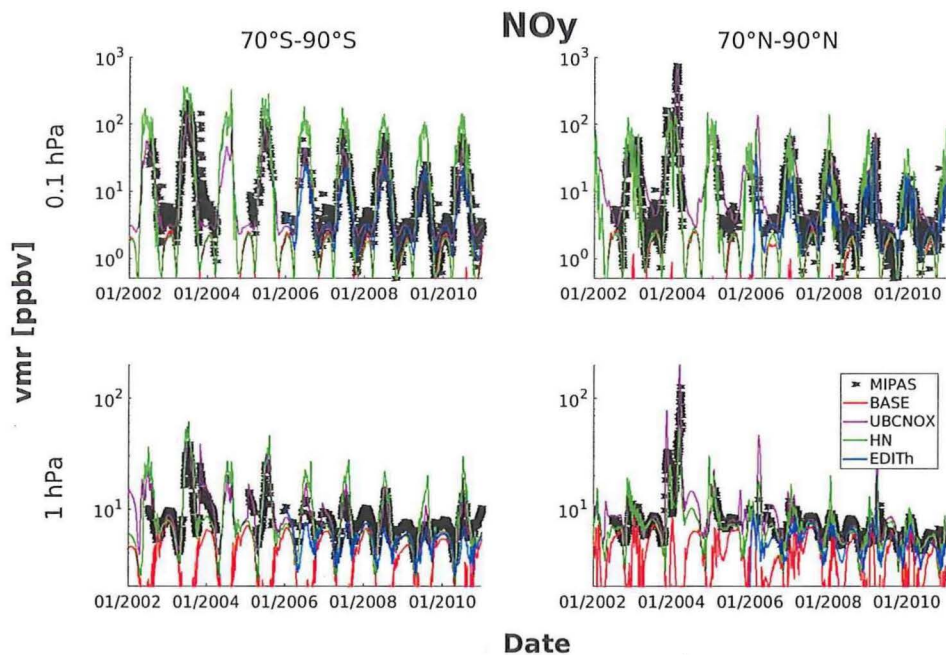


Abbildung 4: Vergleich von vom *MIPAS*-Instrument gemessenem NO_y (schwarze Kreuze) in hohen südlichen ($70\text{--}90^\circ\text{S}$, links) und hohen nördlichen ($70\text{--}90^\circ\text{N}$, rechts) Breiten mit Ergebnissen von verschiedenen Parametrisierungen des auroralen Forcings. Blau: Parametrisierung der Ionisationsraten nach K_p , *EMAC/EDITH*; grün: Parametrisierung der mesosphärischen NO_y -Bildungsrate, *EMAC*; magenta: Parametrisierung des mesosphärischen NO_y -Gehalts aus *MIPAS*-Messungen, *EMAC*. Rot: Referenzlauf ohne aurorales Forcing, *EMAC*. Obere Panels: mittlere Mesosphäre (0.1 hPa , $\approx 60\text{ km}$), unteres Panel: Stratopause (1 hPa , $\approx 45\text{ km}$).

auroralen Ionisation in „high-top“-Modellen zu verwenden, sowie eine Parametrisierung für „medium-top“-Modelle aus dafür durchgeführten Sensitivitätsstudien mit *3dCTM* mit der neu entwickelten Parametrisierung für „high-top“-Modelle zu entwickeln.

M2-1 Sensitivitätsstudien mit hoher/niedriger geomagnetischer Aktivität als Grundlage für die Parametrisierung für medium-top-Modelle Mit der Parametrisierung der Ionisationsraten nach dem K_p -Index (siehe M2-2) wurden Sensitivitätsläufe mit *3dCTM* durchgeführt. Dazu wurde für jedes der 13 K_p -Intervalle der Parametrisierung je ein 30 Tage langer Modellrun für jeden Monat des Jahres aufgesetzt, sowie ein Referenzlauf ohne aurorales Forcing. In den ersten Tagen wird die Hintergrundionisierung vorgegeben ($K_p=0$), um einen realistischen NO_x -Hintergrund zu erhalten, dann wird für einen Tag der entsprechende K_p -Wert gesetzt. Die Ergebnisse dieser Sensitivitätsläufe wurden verwendet, um eine Parametrisierung der NO_y -Produktion durch aurorales For-

cing in der Mesopause zu entwickeln (siehe folgenden Abschnitt). Modellläufe mit einem „high-top“-Modell sind notwendig, da sich das aurorale NO_y in der Mesosphäre aus zwei Komponenten zusammensetzt: der direkten Produktion in der Mesosphäre sowie dem indirekten Anteil durch Transport aus der Thermosphäre in die Mesosphäre. Dieser zweite Beitrag überwiegt insbesondere im polaren Winter.

M2-2 Parametrisierung des auroralen Forcings für high-top und medium-top-Modelle

Aus den Ergebnissen des *AIMOS*-Modells für den Zeitraum 2002–2010 wurde eine Parametrisierung der atmosphärischen Ionisation durch präzipitierende Elektronen (aurorales Forcing) aufgrund der geomagnetischen Aktivität erstellt, die Tageswerte auf einem Breiten-Druckgitter zur Verfügung stellt. Dazu wurden die *AIMOS*-Daten nach der geomagnetischen Aktivität in 13 Intervalle von $K_p=0$ bis $K_p=6$ zusammengefasst. Das erste Intervall bezeichnet den Bereich $K_p=0-0.5$ und enthält, konsistent mit den *AIMOS*-Daten, eine von Null verschiedene Hintergrundionisierung im Aurora-Bereich; dies ergibt auch eine bessere Übereinstimmung von modelliertem mit gemessenem mesosphärischen und thermosphärischen NO_y . Die Parametrisierung liegt vor auf einem 10° Breitengitter und auf 67 Druckleveln von 1000– 1.7×10^{-7} hPa (erster Teil von M2-2). Die Parametrisierung wurde in einem transienten Modelllauf mit vorgeschriebener Dynamik mit *EMAC/EDITH* im Zeitraum 2006–2010 getestet und das modellierte NO_y in der Mesosphäre anhand von Messungen des *MIPAS*-Instrumentes evaluiert (blaue Linie in Abb. 4). Es zeigt sich qualitativ eine gute Übereinstimmung insbesondere in der mittleren Mesosphäre (0.1 hPa), und diese Parametrisierung wird im Folgenden für *EMAC/EDITH* verwendet, aber nicht für *CESM1(WACCM)*, welches bereits eine Parametrisierung des auroralen Elektronenflusses nach der auroralen hemisphärischen Power enthält.

Aus den Ergebnissen der Sensitivitätsläufe (M2-1) wurde für jeden Monat, jedes Drucklevel in der Mesosphäre, jede Längen-Breitenbox des Modells, und jedes Bin der geomagnetischen Aktivität der Einfluss des auroralen NO_y aus der Differenz zu dem entsprechenden Referenzlauf bestimmt. Um den Beitrag von Vertikaltransport, Bildung durch präzipitierende Elektronen, und photochemischem Verlust zu trennen, wurde einerseits aus einem exponentiellen Abfall die Netto-Verlustrate bestimmt, andererseits das aurorale NO_x kumulativ aufaddiert. Aus dem zeitlichen Verlauf wurden dann die lokalen Produktionsraten bestimmt. Die Summe aller lokalen Produktionsraten ergibt so eine Gesamtproduktionsrate von NO_y in Abhängigkeit von Drucklevel, Jahreszeit, täglichem geomagnetischen K_p -Index, Länge und Breite (zweiter Teil von M2-2). Die Parametrisierung wurde in einem transienten Modelllauf mit vorgeschriebener Dynamik mit *EMAC* im Zeitraum 2002–2010 getestet und das modellierte NO_y (grüne Linie in Abb. 4) in der Mesosphäre anhand von Messungen des *MIPAS*-Instrumentes evaluiert. Es hat sich allerdings gezeigt, dass der Beitrag des auroralen NO_y in der Mesosphäre mit dieser Parametrisierung von *EMAC* systematisch überschätzt wird. Dies hat zwei Gründe. Zum Einen werden durch die Implementierung als Produktionsrate in der obersten Modellbox Probleme des verwendeten „medium-top“-Modells mit dem Vertikaltransport in der oberen Mesosphäre deutlich. Zum Anderen hängt die Parametrisierung von Transport und

Mischen von auroralem NO_y über die Mesopause und dem Vertikaltransport in der obersten Mesosphäre im verwendeten „high-top“-Modell ab. Deshalb wurde in Kooperation mit B. Funke (IAA-CSIC) alternativ eine Parametrisierung getestet, die eine obere Randbedingung von NO_x abhängig vom geomagnetischen Forcing, der Jahreszeit, der Breite, und des Drucklevels auf Basis von Beobachtungen von mesosphärischem NO_y vom *MIPAS*-Instrument bietet (Funke et al., 2016). NO_y aus der Randbedingung wird in jedem Rechenzeitschritt in allen Modellleveln oberhalb von 10 Pa (0.1 hPa) durch die Randbedingung als Mischungsverhältnis von NO vorgeschrieben, parametrisiert in Abhängigkeit von der Breite, dem Druck, und dem geomagnetischen Ap-Index. Um die Gesamtmenge von NO_y zu erhalten, wird NO_2 auf Null gesetzt. Die Parametrisierung enthält eine Detektion und spezielle Parametrisierung von plötzlichen Stratosphärenerwärmungen mit erhöhter Stratopause (Funke et al., 2016), bei denen besonders viel NO_y in die Mesosphäre eingetragen wird. Diese von uns mit *EMAC* getestete, auf *MIPAS*-Daten basierende obere Randbedingung gibt das gemessene NO_y in der Mesosphäre sehr gut wieder, insbesondere auch nach plötzlichen Stratosphärenerwärmungen (siehe magenta Linie in Abb. 4 und Sinnhuber et al. (2017)), und wird von uns als aurorales Forcing für „medium-top“-Modelle für CMIP-6 empfohlen (Matthes et al., 2017).

M2-3 Untersuchung des auroralen Signals von der Thermosphäre bis zu Oberfläche

Um den Einfluss des auroralen Forcings auf die Zusammensetzung, Strahlungsbilanz, und Dynamik der Atmosphäre zu untersuchen, wurden eine Reihe von Modellexperimenten durchgeführt: ein transienter Lauf mit *EMAC/UBCmod* von 2002–2010 mit vorgeschriebener Dynamik sowie ein zugehöriger Referenzlauf von *EMAC* ohne aurorales Forcing, sowie je zwei Zeitscheibenexperimente über 40 Jahre bzw. 30 Jahre mit hohem und niedrigem auroralen Forcing mit *WACCM(S15mod)*, *EMAC/EDITH*, und *EMAC/UBCmod* (siehe Abschn. 2.1.5, M3-4 und M3-6).

Transiente Läufe mit vorgeschriebener Dynamik sind besonders geeignet, um zu untersuchen, wie gut das Modell den auroralen Einfluss auf messbare Parameter wie NO_y und Ozon wiedergibt. Der Lauf mit *EMAC/UBCmod* zeigt eine sehr gute Übereinstimmung mit von *MIPAS* im selben Zeitraum gemessenem NO_y und Ozon (Sinnhuber et al., 2017). Untersuchungen des auroralen Einflusses im transienten Lauf von *EMAC/UBCmod* im Vergleich zu dem Referenzlauf ohne aurorales Forcing zeigen Ozonverluste, die im Laufe des polaren Winters von der Stratopause in die untere Stratosphäre wandern, mit einer mit der geomagnetischen Aktivität und dynamischen Situation variierenden Stärke von 2-50 % (siehe mittleres Panel in Abb. 5). Ozonverluste von einigen Prozent können in der Stratosphäre über den ganzen folgenden Sommer anhalten und sind besonders ausgeprägt nach plötzlichen Stratosphärenerwärmungen und solaren Protonenereignissen im Spätwinter oder Frühling. Mit stratosphärischem Ozonverlusten verbunden sind Änderungen in der Strahlungsheizung und Kühlung; im polaren Winter überwiegt ein Netto-Heizen durch den Ozonverlust (Abnahme der Strahlungskühlung im IR) von einigen zehntel K/Tag an der Stratopause, während im Frühling ein Netto-Kühlen (Abnahme der Strahlungsheizung im UV) überwiegt (unteres Panel von Abb. 5). Dies ist konsistent mit Untersuchungen von meteorologischen Analysen, welche eine Zunahme

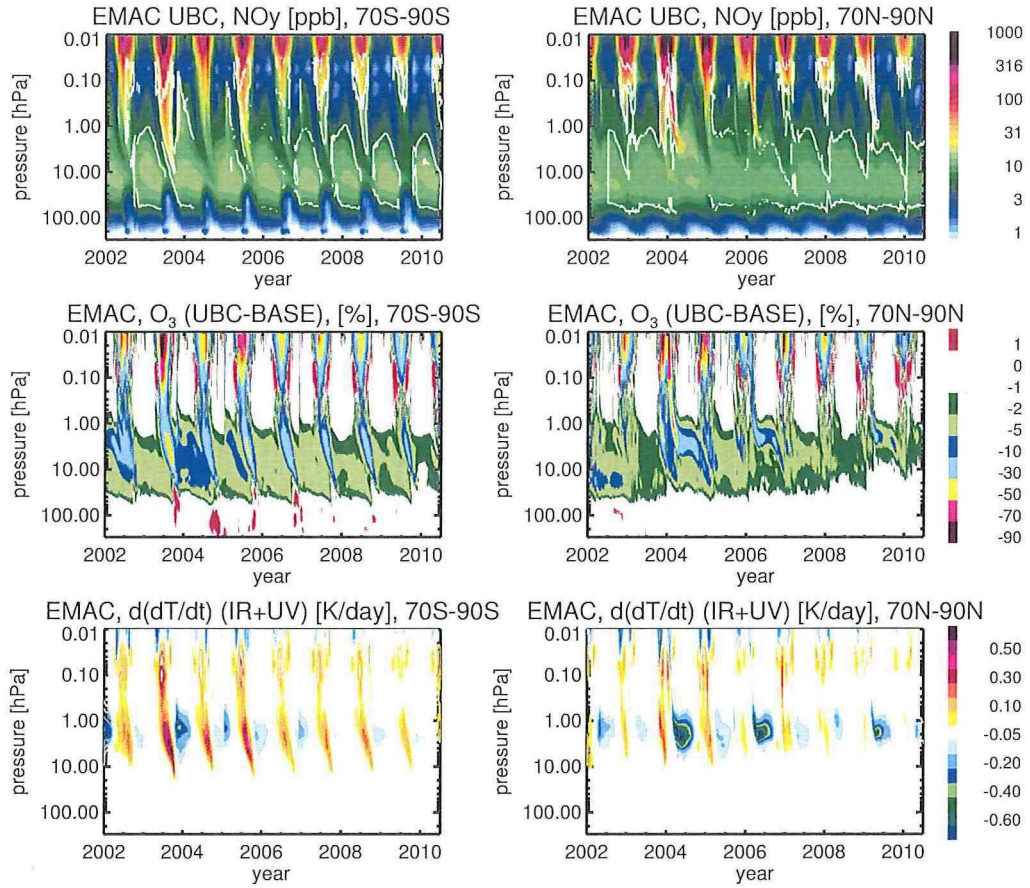


Abbildung 5: *EMAC/UBCmod* verglichen mit einem Referenzlauf ohne aurorales Forcing. Modellläufe mit vorgeschriebener Dynamik, 2002-2010. Von oben nach unten: NO_y im *UBCmod*-Lauf; die Ozondifferenz aufgrund des auroralen Forcings (*UBCmod*-Referenz), und die Änderung im Netto-Strahlungsheizen aufgrund der Ozonänderungen. Links: hohe südliche Breiten (70–90°S), rechts: hohe nördliche Breiten (70–90°N). Alle Abbildungen adaptiert aus Sinnhuber et al. (2017). Die weißen Linien in den obersten Abbildungen sind über sieben Tage geglättete Konturen von gemessenem NO_y vom *MIPAS*-Satelliteninstrument (10, 20, 100, und 1000 ppb).

der Temperatur an der polaren Stratopause im Mitwinter zeigen, aber eine Verstärkung des stratosphärischen Polarwirbels und eine Abkühlung der (unteren) Stratosphäre im Frühling (Lu et al., 2008; Seppälä et al., 2013). Diese Ergebnisse sind in Sinnhuber et al. (2017) veröffentlicht.

Zeitscheibenexperimente mit freilaufender Dynamik sind notwendig, um den Einfluss des auroralen Forcings auf Temperaturen und Windfelder in der Atmosphäre zu untersuchen. Eine erste Analyse der in M3-4 und M3-6 durchgeführten Zeitscheibenexperimente zeigt eine im Mittel qualitativ gute Übereinstimmung der Modellergebnisse für hohes aurorales Forcing mit gemessenem NO_y in Wintern mit sehr hoher auroraler Aktivität (Südhemisphärenwinter 2003, siehe oberes Panel von Abb. 6, Nordhemisphärenwinter 2002-2003, nicht gezeigt). *EMAC/UBCmod* und *EMAC/EDITH* geben auch die Amplitude des in die Mesosphäre und Stratosphäre absinkenden NO_y sehr gut wieder. Jedoch wird das Signal von *WACCM(S15mod)* in der Stratosphäre und unteren Mesosphäre trotz der zur Verbesserung des vertikalen Spurengastransportes durchgeführten Änderungen (siehe Modellbeschreibung und Smith et al., 2015) deutlich unterschätzt. Grund für die Unterschätzung des stratosphärischen NO_y ist vermutlich ein zu langsamer Abwärtstransport in der polaren winterlichen Mesosphäre. Dadurch wird wahrscheinlich der Einfluss des auroralen Forcings auf stratosphärisches Ozon und Temperaturen in der Stratosphäre und Troposphäre von *WACCM(S15mod)* ebenfalls unterschätzt. Sowohl *WACCM(S15mod)* als auch *EMAC/UBCmod* zeigen durch das aurorale Forcing bedingte Ozonverluste, die sehr gut mit den Ergebnissen der im vorhergehenden Abschnitt beschriebenen transienten Läufe übereinstimmen (linkes und rechtes Bild im dritten Panel, Abb. 6), wobei allerdings tatsächlich die Amplitude des Ozonverlustes in *WACCM(S15mod)* niedriger ist als in *EMAC/UBCmod*. Die Temperaturänderungen in der Stratosphäre in *WACCM(S15mod)* und *EMAC/UBCmod* zeigen wiederum ein ähnliches Verhalten, welches konsistent ist mit den im vorhergehenden Abschnitt diskutierten Änderungen der Netto-Strahlungsheizung: eine Erwärmung von 1–5 K im Mitwinter in der obersten Stratosphäre und Mesosphäre, eine Abkühlung von 1–7.5 K im Spätwinter und Frühjahr, die in *EMAC/UBCmod* von der Stratopause in die unterste Stratosphäre wandert, in *WACCM(S15mod)* jedoch in der oberen Stratosphäre verbleibt (linkes und rechtes Bild im untersten Panel, Abb. 6). Bei *EMAC/EDITH* zeigt der Lauf mit niedrigem auroralen Forcing sehr ähnliche Werte von meso-stratosphärischem NO_y wie der Lauf mit hohem auroralen Forcing (mittleres Bild in der zweiten Reihe, Abb. 6). Dies ist anscheinend auf eine unrealistisch große Verstärkung des Abwärtstransportes in der unteren Thermosphäre im freilaufenden *EDITH*-Lauf mit niedrigem auroralen Forcing zurückzuführen. Der Grund dafür ist vermutlich eine Kombination aus der veränderten Filterung von Wellen in der Stratosphäre im freilaufenden Modell, und den starken Änderungen von Temperatur und Windfeldern durch Joule-Heizen, NO-Kühlen, und Ionenbeschleunigung der Neutralwinde (siehe mittleres Bild im untersten Panel, Abb. 6) in der Thermosphäre. Eine Veröffentlichung zu diesen Ergebnissen ist in Planung (Sinnhuber et al., in Planung).

Die beobachteten Schwierigkeiten der beiden „high-top“-Modelle, den Transport von auroralem NO_y in der Mesosphäre (*WACCM(S15mod)*) oder der unteren Thermosphäre

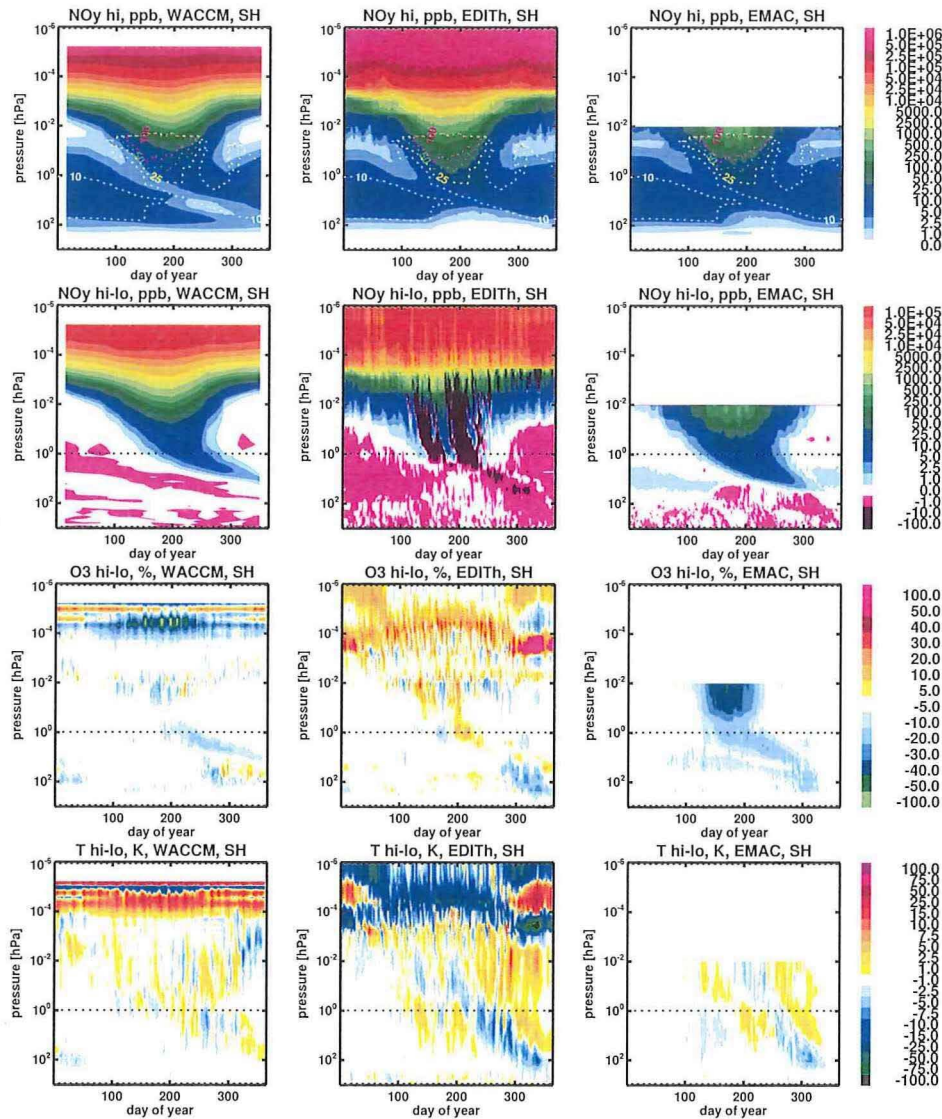


Abbildung 6: Ergebnisse von Zeitscheibenläufen mit hohem und niedrigem auroralen Forcing (M3-4 und M3-6). Links: *WACCM(S15mod)*, Mitte: *EMAC/EDITH*, rechts: *EMAC/UBCmod*. Von oben nach unten: NO_y im Lauf mit hohem auroralen Forcing; die Differenz von NO_y (hohes-niedriges Forcing); die prozentuale Differenz von Ozon (hohes-niedriges Forcing); und die Differenz in der Temperatur (hohes-niedriges Forcing). Jeweils tägliche Werte im vieljährigen Mittel, mit Ausnahme vom obersten und zweiten Bild links (*WACCM(S15mod)* NO_y), welches Monatsmittel im vieljährigen Mittel zeigt. Die gestrichelte schwarze Linie bezeichnet 1 hPa, ungefähr die Lage der Stratopause. Die gestrichelten bunten Linien im obersten Panel bezeichnen Isolinien von mit *MIPAS* gemessenem NO_y im Südhemisphärenwinter 2003.

(*EMAC/EDITH*) wiederzugeben, lassen sich in beiden Fällen wahrscheinlich ursächlich auf die Notwendigkeit zurückführen, die Schwerewellenbeschleunigung im Modell mit relativ einfachen Modellen zu parametrisieren. Dies ist ein strukturelles Problem für den meridionalen Transport in CCMs, welches besonders deutlich im Bereich der Mesosphäre und darüber auftritt, da die verwendeten Parametrisierungen für die Stratosphäre entwickelt und optimiert wurden; und in freilaufenden Modellläufen, da dort die Quellregion der Wellen nicht durch Messungen von Temperaturen und Windfeldern vorgegeben ist. „medium-top“-Modelle wie das hier verwendete *EMAC/UBCmod* sind hiergegen robuster, da das aurorale Forcing bis in die mittlere Mesosphäre vorgegeben ist, und solche Modelle sind derzeit für die Untersuchung des auroralen Einflusses auf die Dynamik der Stratosphäre und Troposphäre möglicherweise empfehlenswerter. Solche Modellstudien mit „medium-top“-Modellen könnten weiter vereinfacht werden, indem statt des auroralen NO_y in der Mesosphäre der aurorale Einfluss auf stratosphärisches Ozon, z.B. basierend auf unseren Ergebnissen aus M2-3, parametrisiert wird, so dass Modellversionen ohne volle Chemie verwendet werden können. Für die „high-top“-Modelle ist eine Verbesserung der Parametrisierung der Schwerewellenbeschleunigung erforderlich, die insbesondere auch im Bereich der Mesopause optimiert ist und die Propagation von Schwerewellen in die Thermosphäre berücksichtigt.

2.1.5 Ergebnisse WP3: Unsicherheiten im solaren Antrieb

M3-1 Durchführung/Analyse von Offline-Kalkulationen mit FUBRad und Ein-Zeitschritt-Integrationen mit CESM1(WACCM) und EMAC/EDITH für solares Minimum aus NRLSSI1 Zunächst wurde von den Verbundpartnern gemeinsam entschieden, sämtliche Referenzkalkulationen und -simulationen nicht auf Basis des *NRLSSI1*-Datensatzes (Lean et al., 2005), welcher eine aus Proxies abgeleitete Rekonstruktion der spektralen solaren Einstrahlung darstellt, durchzuführen, sondern stattdessen das auf Beobachtungsdaten des *Atmospheric Laboratory of Applications and Science 3* beruhende *Reference Solar Spectrum Version 1 (RSSV1-ATLAS3*; Thuillier et al., 2004, im Folgenden nur noch als *ATLAS3* abgekürzt) zu verwenden. Bisher wurde dieser Datensatz noch für keinerlei Simulationen mit komplexen CCMs benutzt. *ROMIC-SOLIC* betritt also an dieser Stelle (M3-4) wissenschaftliches Neuland unter Verwendung eines SSI-Datensatzes, der eine genauere Abschätzung der realen spektralen solaren Einstrahlung (für geringe solare Einstrahlung) darstellen sollte als jede der verfügbaren Rekonstruktionen.

Als Vorbereitung der offline-Kalkulationen mit dem *RAD/FUBRAD-MBM* (in WP1 entwickelte offline-Version der *FUBRAD*-Strahlungsparametrisierung) ist die Aufbereitung des Referenzdatensatzes für das solare Minimum durchgeführt worden. Die vorbereitenden Arbeiten umfassen die Ergänzung des Referenzdatensatzes *ATLAS3*, der nur den Wellenlängenbereich von 0,0 bis 2397,7 nm abdeckt, mit Daten des *NRLSSI1*-Datensatzes bis 100.000 nm und Daten des *SATIRE-T*-Datensatzes (Krivova et al., 2010) von 100.000 nm bis 170.000 nm. Diese wurden so skaliert, dass ein kontinuierlicher Verlauf der spektralen Daten gewährleistet ist. Die Ergänzung des *ATLAS3*-Datensatzes ist erforderlich, um eine korrekte Skalierung auf eine TSI von 1361,05 W m⁻² zu erreichen. Das *ATLAS3*-Referenzspektrum ist repräsentativ für den Zustand der Sonne im November 1994. Die offline-Kalkulationen der kurzwelligen Erwärmungsraten für das solare Minimum wurden mit der 106 Banden-Version des *RAD/FUBRAD-MBM* unter Verwendung des *ATLAS3*-SSI-Datensatzes durchgeführt und bilden die Referenzsimulation für die in M3-2 durchgeführten offline-Kalkulationen für das solare Maximum.

M3-2 Durchführung/Analyse von offline-Kalkulationen/Ein-Zeitschritt-Integrationen für andere Strahlungsantriebsdatensätze Die offline-Berechnungen für die Ableitung des solaren Signals der kurzwelligen Erwärmungsraten wurden für Strahlungsantriebe, basierend auf den etablierten SSI-Rekonstruktionen *NRLSSI1* (Lean et al., 2005), *NRLSSI2* (Coddington et al., 2016), *SATIRE-T* (Krivova et al., 2010), *SATIRE-S* (Yeo et al., 2014) und dem neuen SSI-Datensatz *CMIP6-SSI* (Matthes et al., 2017) durchgeführt. Letzterer ist ein Produkt, welches ein direktes Resultat von *ROMIC-SOLIC* ist (siehe Abschn. 2.1.6 und M4-4). Er kam hier erstmals in komplexen Klima-Chemie-Modellen zum Einsatz und wurde auf seine Klimaauswirkungen hin analysiert (siehe auch M3-5, M3-7 und M4-1).

Tabelle 4: Variationen der spektralen, solaren Einstrahlung mit dem 11-jährigen Sonnenfleckenzyklus von Nov. 1989 bis Nov. 1994, relativ zu Nov. 1994 (ΔSSI) in % und der relative Beitrag der SSI Änderungen zu den Änderungen der TSI ($\frac{\Delta SSI}{\Delta TSI}$) in % für Lyman- α (121.5 nm), fernes UV (121–200 nm), Herzberg Kontinuum/Hartley Banden (201–242 nm), Hartley-/Huggings-Banden (243–380 nm) und den sichtbaren (381–780 nm) Spektralbereich.

SSI Datensatz	Lyman- α		121–200 nm		201–242 nm		243–380 nm		381–780 nm	
	ΔSSI	$\frac{\Delta SSI}{\Delta TSI}$	ΔSSI	$\frac{\Delta SSI}{\Delta TSI}$	ΔSSI	$\frac{\Delta SSI}{\Delta TSI}$	ΔSSI	$\frac{\Delta SSI}{\Delta TSI}$	ΔSSI	$\frac{\Delta SSI}{\Delta TSI}$
NRLSSI1	44.29	0.27	11.07	1.14	3.48	5.32	0.27	22.91	0.08	54.90
NRLSSI2	50.38	0.29	11.39	1.13	3.26	4.79	0.35	29.04	0.07	41.41
SATIRE-T	35.57	0.30	7.58	1.08	2.58	5.49	0.41	48.55	0.05	42.79
SATIRE-S	57.48	0.33	12.09	1.19	3.60	5.30	0.55	45.52	0.07	42.96
CMIP6	53.94	0.31	11.74	1.15	3.43	5.00	0.45	36.86	0.07	41.86

Die Basis für die konkreten SSI-Datensätze des solaren Maximums stellt jeweils der *ATLAS3*-SSI-Datensatz dar, zu dem jeweils die Änderungen der SSI-Datensätze zwischen November 1994 und November 1989 addiert wurden. Auf diese Weise wurden Strahlungsantriebe konstruiert, die auf einer einheitlichen Referenz für das solare Minimum beruhen und sich nur hinsichtlich ihrer spezifischen Amplitude des 11-jährigen Sonnenzyklus voneinander unterscheiden. Etwaige Differenzen in den Signalen sind damit eindeutig nur auf diese unterschiedlichen Repräsentationen solarer Variabilität zurückzuführen. Die Tabelle 4 gibt für vier Spektralbereiche und für Lyman- α eine Übersicht der SSI-Änderungen relativ zu November 1994 in % (ΔSSI) und die relativen Beiträge der SSI-Änderungen zu den TSI-Änderungen ($\frac{\Delta SSI}{\Delta TSI}$). Der *NRLSSI1*-Datensatz hat unter den verwendeten SSI-Datensätzen das niedrigste $\frac{\Delta SSI}{\Delta TSI}$ Verhältnis im UV, das auch niedriger ist als das aus beobachteten SSI abgeleitete $\frac{\Delta SSI}{\Delta TSI}$ Verhältnis (Ermolli et al., 2013). Diese geringe UV-Variabilität des *NRLSSI1*-Datensatzes könnte dazu beigetragen haben, dass die Effekte des 11-jährigen Sonnenfleckenzyklus in globalen Modellen, wie sie für *CCMVal* und *CMIP5* verwendet wurden, unterschätzt wurden (Ermolli et al., 2013) und hat die im Rahmen von *SOLIC* geleistete Erstellung eines neuen TSI/SSI-Datensatzes für die Verwendung bei *CMIP6* motiviert (siehe Abschn. 2.1.6 M4-4 und Matthes et al., 2017).

Die Auswertung der offline-Kalkulationen mit *RAD/FUBRAD-MBM* ergaben solare Signale der kurzwelligen Erwärmungsraten, die sich direkt mit den in Tab. 4 aufgelisteten ΔSSI Amplituden der entsprechenden Spektralbereiche in Zusammenhang bringen lassen (nicht gezeigt). Im weiteren Projektverlauf wurden diese Ergebnisse mit jenen der CCM-Simulationen abgeglichen (siehe M3-7).

M3-3 Ein-Zeitschritt-Integrationen mit vollwertigen Klima-Chemie-Modellen für die Ableitung von Photolyseraten Die Photolyseraten wurden für alle mit *EMAC* und *CESM1(WACCM)* durchgeführten Experimente nach dem jeweils ersten Zeitschritt abgespeichert und analysiert. Diese, sich instantan ergebenden, Photolyseraten zeigen, inwieweit die verschiedenen Strahlungsantriebe allein zu Unterschieden hinsichtlich der chemischen Prozessketten führen können.

Im Ergebnis ist bemerkenswert, dass hinsichtlich der Photodissoziation von molekularem Sauerstoff die solar induzierten Signale als Folge des *SATIRE-T*-Antriebes systematisch schwächer ausfallen (für *CESM1(WACCM)* und *EMAC* über das gesamte Höhenprofil) als die aller anderen Antriebsdatensätze. Dies ist ein Resultat der deutlich schwächer ausgeprägten solaren Amplitude von *SATIRE-T* im UV-Bereich unterhalb von 242 nm (siehe M3-2 und Tab. 4). Infolgedessen muss das solar induzierte Signal der Ozonproduktion deutlich schwächer ausfallen. Für die meisten anderen betrachteten Größen lässt sich feststellen, dass die beiden Modelle bis in eine Höhe äquivalent zu ca. 0,1 hPa sehr ähnliche Signale zeigen. Auch die verschiedenen Strahlungsantriebe zeigen hier kaum unterschiedliche Auswirkungen. Oberhalb von 0,1 hPa hingegen weichen die Ergebnisse für die verschiedenen Antriebe und Modelle zum Teil deutlich voneinander ab. Beide Modelle weisen für alle Strahlungsantriebe ähnliche solare Signale der Photodissoziation von Ozon bis in die mittlere Stratosphäre (ca. 5 hPa) auf, um sich darüber aber zunächst im Hinblick auf den Strahlungsantrieb und oberhalb von 1 hPa dann zusätzlich im Hinblick auf das zugrundeliegende Modell zu differenzieren. Für die Produktion von atomarem Sauerstoff im Grundzustand ($O(^3P)$) ist dabei im Wesentlichen der Strahlungsantrieb von Bedeutung (stärkste Änderung der Photolyseraten für *SATIRE-S*, gefolgt von *CMIP6-SSI*), während für die Produktion von atomarem Sauerstoff im angeregten Zustand ($O(^1D)$) zusätzlich auch das verwendete Modell bzw. sein spezifisches Photolyseschema (*CESM1(WACCM)* mit durchgängig stärkeren Signalen als *EMAC*) zu signifikanten Unterschieden führt.

Im weiteren Verlauf der CCM-Simulationen (M3-4 und M3-5, siehe auch M3-7) führen diese photochemischen Auswirkungen ggf. zu Wechselwirkungen mit der Temperatur und entsprechender Änderungen der Dynamik.

M3-4 Referenzsimulation (30 Jahre) für solares Minimum und geringe aurorale Aktivität Meilenstein M3-4 wurde erfolgreich abgeschlossen, indem mit *CESM1(WACCM)*, *EMAC* und *EMAC/EDITH* jeweils eine Zeitscheibensimulation unter Verwendung eines konstanten solaren Antriebs für Bedingungen geringer solarer Aktivität durchgeführt wurde. Dabei wurde erstmals für eine Simulation mit komplexen Klima-Chemie-Modellen das auf Beobachtungen beruhende Referenzspektrum *RSSV1-ATLAS3* (Thuillier et al., 2004) verwendet. Statt der im Antrag avisierten 30 Modelljahre wurden für eine verbesserte statistische Basis mit *CESM1(WACCM)* und *EMAC* jeweils 45 Modelljahre (inkl. drei- bzw. fünfjährige Einschwingzeit) simuliert, während *EMAC/EDITH* wie vorgesehen 30 Jahre (inkl. Einschwingzeit) gerechnet hat.

M3-5 Simulationen für solares Maximum unter Verwendung verschiedener Strahlungsantriebsdatensätze (4x30 Jahre) Meilenstein M3-5 wurde erfolgreich abgeschlossen, indem mit *CESM1(WACCM)* und *EMAC* jeweils fünf (statt im Antrag vorgesehener vier) Zeitscheibensimulationen unter Verwendung eines konstanten solaren Antriebs für Bedingungen maximaler solarer Aktivität durchgeführt wurden. Analog zu den offline-Berechnungen (M3-2) wurden hier Antriebsdaten verwendet, die auf *RSSV1-ATLAS3* und der solaren Amplitude der etablierten SSI-Rekonstruktionen *NRLSSI1*, *NRLSSI2*, *SATIRE-T*, *SATIRE-S* und des neuen, in *SOLIC* erarbeiteten, *CMIP6-SSI* (Matthes et al., 2017, siehe dazu auch Abschn. 2.1.6, M4-4) beruhen. Letzterer kam hier erstmals für Simulationen mit komplexen Klima-Chemie-Modellen zum Einsatz. Statt der im Antrag avisierten 30 Modelljahre wurden für eine verbesserte statistische Basis jeweils 45 Modelljahre (plus drei bzw. fünfjährige Einschwingzeit) simuliert.

M3-6 Simulation (30 Jahre) für solares Maximum und hohe Auroraaktivität Meilenstein M3-6 wurde erfolgreich abgeschlossen, indem mit *CESM1(WACCM)*, *EMAC* und *EMAC/EDITH* jeweils eine Zeitscheibensimulation unter Verwendung eines konstanten solaren Antriebs für Bedingungen geringer solarer Strahlungsintensität, aber hoher Auroraaktivität durchgeführt wurde. Dabei sind mehrere Punkte erwähnenswert:

1. Anders als im Antragstext formuliert, wurde ein Antrieb mit hoher Auroraaktivität in Kombination mit geringer solarer Strahlungsintensität vorgeschrieben. Als Strahlungsantrieb wurde analog zu M3-4 das auf Beobachtungen beruhende Referenzspektrum *RSSV1-ATLAS3* (Thuillier et al., 2004) verwendet. Die Kombination *solmin* und *aurhigh* ist sinnvoll, weil (i) der *solmin*-Strahlungsantrieb durch das Referenzspektrum *RSSV1-ATLAS3* repräsentativ für den November 1994 ist und jenes Jahr 1994 in Realität durch genau diese Kombination mit hoher Auroraaktivität gekennzeichnet war und (ii) so der direkte Vergleich der Effekte aus Strahlungsvariabilität und auroralem Einfluss (M3-7 und M4-1) möglich ist.
2. Bei *CESM1(WACCM)* und *EMAC* wurden für diesen Meilenstein Modellversionen benutzt, die sich von der sonst im Projekt genutzten Standardversion unterscheiden (siehe Abschn. 2.1.2 und Tab. 2 mit *WACCM(S15mod)* und *EMAC/UBCmod*). Dies geschah, um die jeweils bestmögliche Modellrepräsentation der Prozesse im Zusammenhang mit Auroraeffekten zu erreichen.
3. Die Verwendung einer anderen Modellversion für das jeweilige *aurhigh*-Experiment erforderte die zusätzliche Simulation des zugehörigen *aurlow*-Experiments mit derselben Modellversion.
4. Statt der im Antrag avisierten 30 Modelljahre wurden für eine verbesserte statistische Basis auch hier jeweils 45 Modelljahre (inklusive drei- bzw. fünfjährige Einschwingzeit; 30 Jahre für *EMAC/EDITH*) simuliert.
5. Mit *EMAC/EDITH* wurden zusätzliche Zeitscheibenexperimente durchgeführt (*solmaxCMIP6aurhigh* und *solmaxCMIP6aurlow*), um auch den kombinierten Einfluss von geomagnetischer Aktivität und Photoionisation zu untersuchen.

M3-7 Vergleich der Bedeutung der Effekte für Strahlung und Chemie von der Thermosphäre bis zur Erdoberfläche in den drei verwendeten Klima-Chemie-Modellen

Die SSI-Variationen mit dem 11-jährigen Sonnenfleckenzyklus können nachweislich einen signifikanten Einfluss auf die Temperaturen und die Mischungsverhältnisse verschiedener Bestandteile der Atmosphäre in der Stratosphäre und Mesosphäre haben (z.B. Gray et al., 2010; Ermolli et al., 2013). Für diese Auswertung werden je sechs Zeitscheibensimulationen der zwei Klima-Chemie-Modelle, *EMAC* und *CESM1(WACCM)*, herangezogen. Die Simulationen des Referenzzustands für das solare Minimum beider CCMs entsprechen den unter M3-4 erstellten Simulationen. Die unter M3-5 erstellten Simulationen, unter Vorgabe von fünf verschiedenen SSI-Datensätzen im solaren Maximum, ergeben in der Differenz zu den Referenzsimulationen einen Datensatz mit einer Länge von 450 Jahren (5 SSI-Datensätze, 2 CCMs, je 45 Jahre), der das solare Signal in den atmosphärischen Zustandsgrößen und den atmosphärischen Spurengasen enthält. Die Unsicherheiten des solaren Signals zu quantifizieren ist ein zentrales Anliegen in *SOLIC*. Mit Hilfe einer Zwei-Wege-Analyse der Varianz (ANOVA; siehe z.B. von Storch und Zwiers, 1999), die erstmalig ihren Einsatz für die Untersuchung von solaren Signalen findet, ist es möglich, die Einflüsse der SSI-Datensätze und der verwendeten CCMs auf die Unsicherheit des solaren Signals zu separieren.

In Abbildung 7 sind das solare Signal als Jahresmittel und die Ergebnisse der ANOVA dargestellt für (a) die kurzwelligen Erwärmungsraten, (b) die Temperatur und (c) die Ozonmischungsverhältnisse. Die ANOVA zeigt, dass der verwendete SSI-Datensatz in der oberen Stratosphäre/unteren Mesosphäre (außer polaren Breiten) den größten Anteil der Unsicherheit des solaren Signals der Temperatur und der Ozonmischungsverhältnisse ausmacht. Ein vergleichbarer Einfluss des SSI-Datensatzes kann auch für die kurzwelligen Erwärmungsraten identifiziert werden, der sich darüber hinaus auch in der oberen Mesosphäre zeigt. Grundsätzlich werden hier die Ergebnisse aus den offline-Integrationen (M3-1 und M3-2) bestätigt, zusätzlich aber entscheidend durch Wechselwirkungen mit der Modellchemie moduliert. Während die kurzwelligen Erwärmungsraten als Folge der meisten Antriebsdatensätze auch an der Stratopause relativ ähnlich ausfallen (bei kleineren Unterschieden entsprechend der Rangfolge aus den offline-Integrationen), fällt das solare *SATIRE-T*-Signal der Erwärmungsraten deutlich schwächer aus (nicht gezeigt). Dies ist ein direktes Resultat des signifikant schwächeren Ozonsignals (s.u.). Der größte Einfluss der verwendeten CCMs auf die Ausprägung des solaren Signals, und damit dessen Unsicherheit, zeigt sich in der oberen Mesosphäre über alle Breiten. Die CCMs zeigen aber auch in der unteren Stratosphäre in den Tropen und der nördlichen Hemisphäre (ca. 30°S bis 60°N) einen signifikanten Einfluss auf die Variabilität des solaren Signals, was in dieser Region wahrscheinlich hauptsächlich auf die Modelldynamik zurückzuführen ist. Zusammenfassend kann festgestellt werden, dass signifikante Unterschiede bei der Ausprägung des solaren Signals, also dessen größte Unsicherheiten, in den Regionen der aktiven Ozonproduktion in der oberen Stratosphäre und unteren Mesosphäre hauptsächlich dem Einfluss der SSI-Datensätze zuzuschreiben sind. Im Hinblick auf die einzelnen Datensätze bestätigen hierbei die vollen CCM-Simulationen im Ozon-signal (insbes. das schwache Signal von *SATIRE-T*) die Ergebnisse der Photolyseraten

aus den Ein-Zeitschritt-Integrationen (M3-3). Signifikante Unsicherheiten des solaren Signals, die auf die Unterschiede zwischen den Modellen zurückzuführen sind, können dagegen in der oberen Mesosphäre nahezu global und in der unteren Stratosphäre von tropischen bis in mittlere nördliche Breiten festgestellt werden.

Eine eingehendere Darstellung dieser Ergebnisse wird derzeit für eine Veröffentlichung final aufbereitet (Kunze et al., in Vorbereitung).

Das Kernergebnis der quantitativen Analyse des Auroraeffekts im Vergleich zum Strahlungseffekt (siehe Abb. 8 exemplarisch für Juli, also den südhemisphärischen Winter) auf Basis der *solminATL3aurlow*- und *solminATL3aurhigh*- bzw. *solminATL3*- und *solmaxCMIP6*-Simulationen aus M3-4, M3-5 und M3-6 ist, dass der Strahlungseffekt für die Zielparameter Ozon (~ 3 % an der Stratopause) und Temperatur (~ 1 K an der Stratopause) statistisch signifikant nachweisbar für *CESM1(WACCM)* und *EMAC* über die gesamte Stratosphäre und Mesosphäre (und darüber hinaus) und alle Breiten außer dem Winterpol (aufgrund starker dynamischer Variabilität) ist. Der Auroraeffekt hingegen ist in den Polarregionen südlicher Breite, aber abseits des Winterpols nur im Höhenbereich der Stratopausenregion signifikant, und das auch nur im Fall der *EMAC/UBCmod*-Simulation. In diesem Fall sind die Temperatursignale beider Effekte in diesem Höhenbereich vergleichbar (bei grundsätzlich gegensätzlichen Vorzeichen). Ein Ergebnis von M2-3 war, dass *CESM1(WACCM)* selbst mit der *S15mod*-Modellmodifikation einen tendenziell zu schwachen abwärts gerichteten Transport von NO_y am Winterpol aufweist, so dass davon ausgegangen werden muss, dass die entsprechenden Auswirkungen auf die Ozonkonzentrationen und damit auf die Temperatur ebenfalls etwas zu schwach ausfallen. Wenn man dies berücksichtigt und entsprechend die *EMAC/UBCmod*-Ergebnisse für den Auroraeffekt stärker berücksichtigt, so lässt sich als Synthese festhalten, dass für den wichtigen Höhenbereich des Ozonmaximums Strahlungs- und Auroraeffekt gleichermaßen wichtig sind. Weitergehende Analysen in diesem Zusammenhang werden derzeit für eine Veröffentlichung aufbereitet (Kruschke et al., in Vorbereitung).

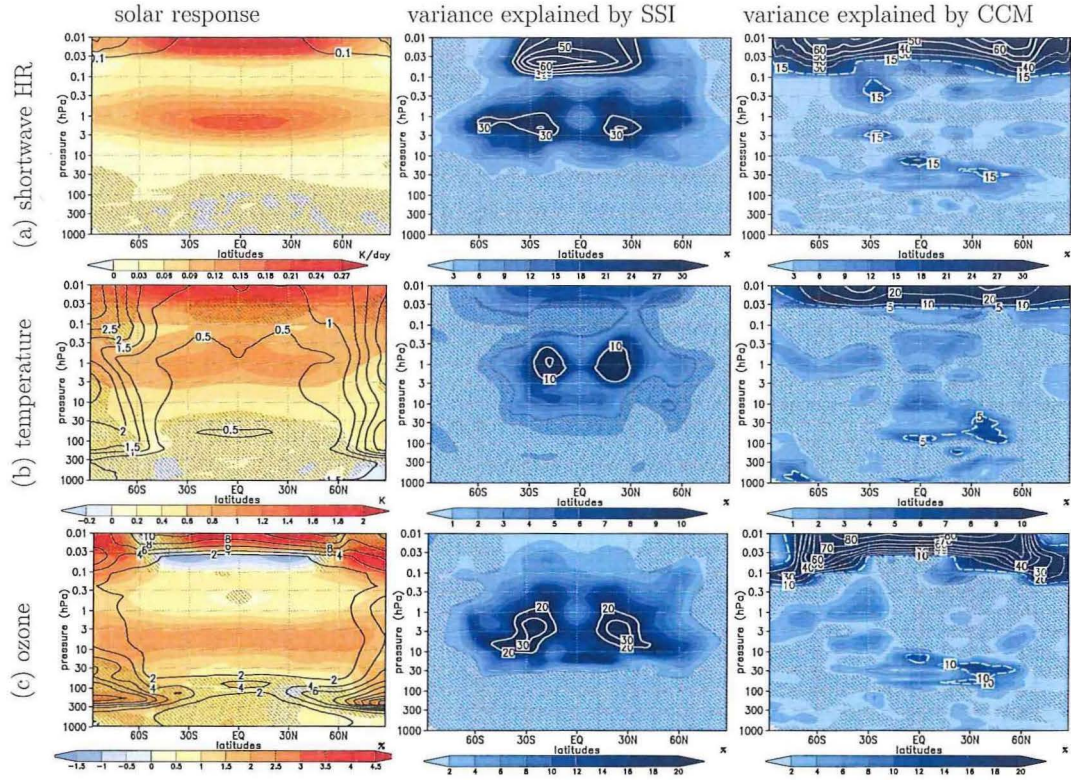


Abbildung 7: Links: Jahresmittel der Signale des 11-jährigen Sonnenfleckenzyklus (schattiert) und die Unsicherheit des Signals (schwarze Konturen) ausgedrückt mit Hilfe der Standardabweichung des solaren Signals für die kurzwelligen Erwärmungsraten (oben), die Temperatur (zweite Zeile) und die Ozonkonzentrationen (unten). Das solare Signal ist abgeleitet als Mittel über beide CCMs und alle SSI-Datensätze; die SSI-Datensätze des solaren Maximums basieren auf dem *ATLAS3*-Referenzzustand. Mittlere Spalte: prozentualer Anteil des Varianz des solaren Signals (d.h. das Quadrat der in der linken Spalte dargestellten Standardabweichung), der durch systematische Unterschiede zwischen den SSI-Datensätzen erklärt werden kann; rechte Spalte: prozentualer Anteil der Varianz des solaren Signals, der durch systematische Unterschiede zwischen den CCMs erklärt werden kann. Die graue Schraffur markiert die Bereiche, die den Test auf statistische Signifikanz nicht bestehen ($p > 0.05$).

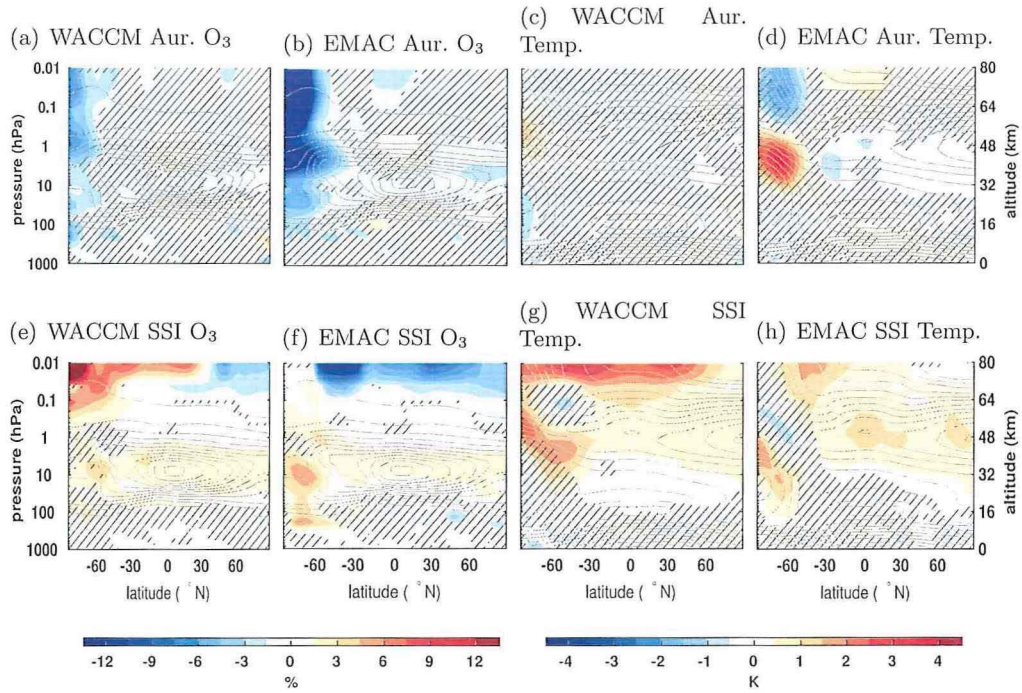


Abbildung 8: Auroraeffekt (*solminATLAS3aurhigh-solminATLAS3aurlow*; a,b,c,d) und Strahlungseffekt (*somaxCMIP6-solminATLAS3*; e,f,g,h) im Juli gem. WACCM(*S15mod*) (a,c,e,g) und EMAC/*UBCmod* (b,d,f,h) für O₃ (a,b,e,f) und Temperatur (c,d,g,h); schraffierte Bereiche sind statistisch nicht signifikant ($p > 0.05$).

2.1.6 Ergebnisse WP4: Relevanz des solaren Signals für dekadische Klimavariabilität

M4-1 Analyse des dynamischen Transfers solarer Signale aus der Thermosphäre zur Erdoberfläche auf Basis der Simulationen aus WP3 Die Zeitscheibensimulationen aus WP3 wurden auf vielfältige Weise hinsichtlich des vertikalen dynamischen Transfers des solaren Signals analysiert. Ein Beispiel stellen die in Abb. 9 dargestellten Ergebnisse dar. Gezeigt ist das solare Signal als Mittel über die jeweils analysierten 45 Modelljahre aller Simulationen aus M3-5 (*solmax*) als Differenz zum *solminATL3*-Experiment (M3-4) für die Monate November bis Februar (erste zwei Spalten von links in Abb. 9). Diese Ergebnisse bzgl. des solaren Signals an sich werden ergänzt durch die Resultate einer ANOVA (rechte zwei Spalten in Abb. 9), die ausweisen, welcher Anteil der Ensemblevarianz (*CESM1(WACCM)*- und *EMAC*- Simulationen gemeinsam), die ja gerade ein Maß für die Unsicherheit des solaren Signals ist, durch die verschiedenen Strahlungsantriebe (dritte Spalte von links) und Modelle (vierte Spalte von links) erklärt wird.

Das zentrale Ergebnis dieser Analysen ist also, dass für die Ausprägung dynamischer Signale als Resultat solarer Variabilität die Wahl des Klima-Chemie-Modells eine Rolle spielt, die unterschiedlichen Strahlungsantriebe in dieser Hinsicht aber zu keinen signifikanten Unterschieden führen! Analog dazu ist das Ergebnis unserer Analysen hinsichtlich der Ausprägung diverser Indizes großskaliger Zirkulationsmuster (*NAO*, *NAM*, *SAM*) oder auch der Frequenz plötzlicher Stratosphärenerwärmungen, dass auch hier keine signifikante Unterschiede, d.h. Unsicherheiten des solaren Signals, in unterschiedlichen Strahlungsantrieben begründet sind. Auch hier spielt die Wahl des Klima-Chemie-Modells eine größere Rolle (hier nicht gezeigt).

Die Analysen hinsichtlich des dynamischen Transfers eines Auroraeffektes zeigen ein komplexes Bild. Wie bereits zu M3-7 beschrieben, verhalten sich die beiden Modelle dabei auch nicht einheitlich. Beide zeigen allerdings durchaus signifikante Signale dynamischer Parameter (z.B. Zonalwind), insbesondere im Spätwinter bzw. zu Beginn des Frühlings, als Folge eines verstärkten Eintrags niedrigenergetischer solarer Elektronen (nicht gezeigt). Hier hat sich ebenfalls gezeigt, dass die Wahl des Klima-Chemie-Modells, und dabei vermutlich die Wahl des verwendeten Schwerewellenantriebes, eine große Rolle spielt.

Die in M4-1 erzielten Ergebnisse werden aktuell für eine wissenschaftliche Veröffentlichung (Kruschke et al., in Vorbereitung) aufbereitet. Sie besitzen große Bedeutung für die Forschung zum solaren Einfluss auf das Klima, da sie diesbezügliche Resultate um eine systematische, quantitative Analyse der Unsicherheiten im Kontext der Modellunterschiede und, erstmals überhaupt in dieser Qualität, unterschiedlicher verfügbarer Strahlungsantriebsdatensätze ergänzt. Dabei ist hervorzuheben, dass die Einbeziehung unterschiedlicher Strahlungsantriebe kaum einen Einfluss auf die Gesamtunsicherheit des solaren Signals in dynamisch geprägten Parametern besitzt.

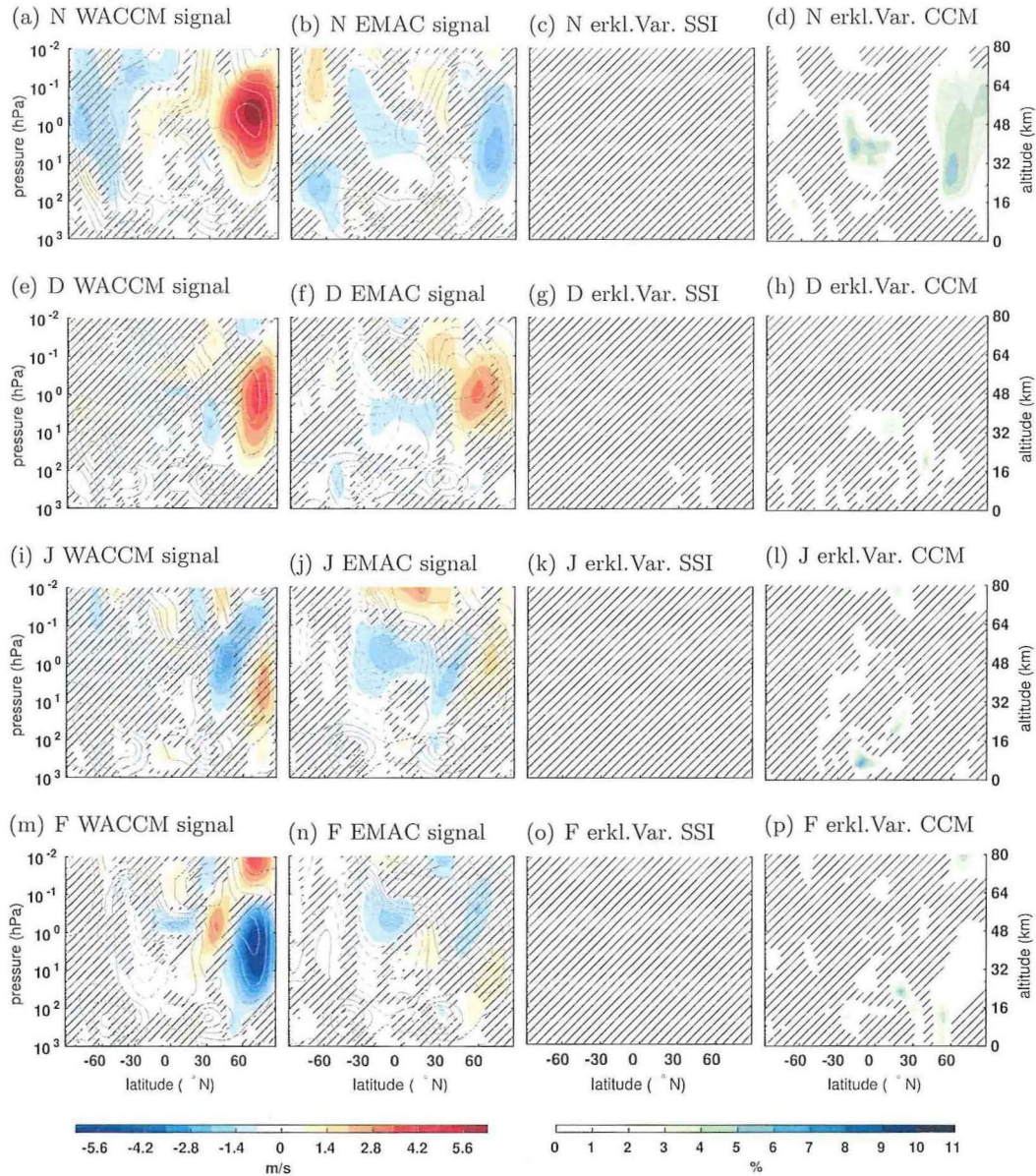


Abbildung 9: Solares Signal (Konturflächen; $sol_{max} - sol_{min}$) im zonal gemittelten Zonalwind für Nov. (a-d), Dez. (e-h), Jan. (i-l) und Feb. (m-p) gem. *CESM1(WACCM)* (a,e,i,m) und *EMAC* (b,f,j,n), jeweils gemittelt über alle Strahlungsantriebe, sowie Anteil der Varianz (Unsicherheit) des Gesamtensembles der durch die versch. Strahlungsantriebe (c,g,k,o) und Modelle (d,h,l,p) erklärt wird; graue Konturen in ersten zwei Spalten kennzeichnen jew. monat. Modellklimatologie aus dem *solminATL3*-Experiment (Intervall 10 m/s); schraff. Bereiche sind statistisch insignifikant ($p > 0.05$).

M4-2 und M4-3 Vergleich obiger Ergebnisse mit existierenden Simulationen aus CCMVal und CMIP5-Simulationen Aufgrund des verzögerten Projektstartes gab es bereits eine Serie von Veröffentlichungen, die sich mit der Analyse des solaren Signals in *CMIP5*-Klimamodellen intensiv auseinandergesetzt (Mitchell et al., 2015; Misios et al., 2016; Hood et al., 2015) und insbesondere in Hood et al. (2015) auch die Rolle der Chemie genauer beleuchtet hat. Die wichtigsten Ergebnisse werden hier kurz skizziert. Die Mehrheit der Modelle, die an *CMIP5* beteiligt waren, benutzte im Gegensatz zu den *SOLIC*-Experimenten, kein interaktiv berechnetes Ozon, sondern ein vorgeschriebenes Ozonfeld, welches das solare Ozonsignal nur mäßig repräsentierte, wie sich im Nachhinein herausstellte (e.g., Hood et al., 2015; Maycock et al., 2016). Die Verwendung von vorgeschriebenem anstelle von interaktiv berechnetem solarem Ozonsignalen führte zu einer systematischen Unterschätzung der dynamischen „top-down“-UV-Signale von der Stratosphäre (Hood et al., 2015), weswegen auch die Analyse der solaren Signale am Erdboden recht uneinheitlich ausfiel (Misios et al., 2016). Die Ergebnisse dieser Studien sind in *SOLIC* eingeflossen und führten dazu, dass die Empfehlung für das solare Forcing für *CMIP6* neben dem Strahlungs- und energetischem Teilchenforcing auch eine explizite Empfehlung zur Benutzung eines solaren Ozonfeldes (entweder vorgeschrieben oder interaktiv mitgerechnet) enthielt (Matthes et al., 2017; Maycock et al., 2017). Außerdem wurde für alle in *SOLIC* durchgeführten Ergebnisse interaktiv berechnetes Ozon verwendet, um die Repräsentation des solaren Signaltransfers zum Erdboden bestmöglich darzustellen. Ein Vergleich des Einflusses von *CMIP5*- gegenüber *CMIP6*-Strahlungsantriebsdaten sowie der Einfluss von vorgeschriebenem vs. explizit gerechnetem solarem Ozonforcing unter Verwendung der im Rahmen von WP3 in *SOLIC* durchgeführten Modellsimulationen ist in Matthes et al. (2017) und Maycock et al. (2017) zu finden.

M4-4 Empfehlungen bzgl. verlässlichem solaren Antriebsdaten, Strahlungsschemata (Auflösung), Model-Top Frühzeitig im Projekt war aufgrund der Zwischenergebnisse aus WP3 festzustellen, dass die Effekte des 11-jährigen Sonnenzyklus auf das Klima fast unabhängig vom antreibenden Strahlungsdatensatz sind. Gleichzeitig stellten wir und internationale Kollegen aus der *SOLARIS-HEPPA*-Initiative jedoch fest, dass substantielle Unterschiede zwischen den verschiedenen Strahlungsdatensätzen bzgl. der mittleren spektralen Energieverteilung bestehen. So weist z.B. *SATIRE-S* im Vergleich zu *NRLS-S11* im UV-Bereich (200-400 nm) eine um ca. 1,5-2 W/m² geringere Strahlungsintensität auf, dafür aber im sichtbaren Bereich des Spektrums (400-800 nm) ca. 0,5-0,75 W/m² mehr. Für die in M4-4 beabsichtigte Empfehlung eines verlässlichen solaren Antriebs für Klima-Chemie-Modelle ergab sich daraus die Notwendigkeit, die Auswirkungen dieser Diskrepanzen zu untersuchen. Dafür wurden insgesamt zehn zusätzliche, im Antrag nicht vorgesehene, Experimente jeweils mit *CESM1(WACCM)* und *EMAC* durchgeführt (siehe Tab. 2). Diese gleichen weitestgehend den Experimenten aus M3-4 und M3-5, verwenden aber als Strahlungsantrieb die direkt aus den jeweiligen Datensätzen abgeleiteten spektralen Strahlungsintensitäten für *solmin* (Nov. 1994) und *solmax* (Nov. 1989), ohne dabei (wie in M3-5) *RSSV1-ATLAS3* als gemeinsame Basis zu verwenden.

Die auf diesen Simulationen basierenden Auswertungen wurden in der Studie von (Matthes et al., 2017) veröffentlicht und bilden die wissenschaftliche Rechtfertigung für die im Rahmen von *ROMIC-SOLIC* und *SOLARIS-HEPPA* erarbeitete Empfehlung, Aufbereitung und Bereitstellung eines Datensatzes für den solaren Antrieb von Klima-Chemie-Modellsimulationen im Kontext von *CMIP6*.

Für eine realistische Repräsentation der solaren Variabilität in Klima-Chemie-Modellen ist eine ausreichende spektrale Auflösung der Parametrisierung für die Erwärmungsraten durch die solare Einstrahlung erforderlich. In WP1 wurde eine Abschätzung des Fehlers für die Variationen der kurzwelligen Erwärmungsraten mit dem 11-jährigen Sonnenfleckenzyklus bei verschiedenen spektralen Auflösungen für das *EMAC* Strahlungsmodul *FUBRAD* vorgenommen. Bei einem noch zu tolerierenden Fehler von $\sim 1\%$ ist in der *FUBRAD*-Parametrisierung eine spektrale Auflösung von 28 Banden im Bereich von 206,5–690 nm erforderlich (bzw. 33 oder 51 Banden von 121–690 nm, vergl. 2.1.3 M1-4). Einschränkend muss an dieser Stelle aber darauf hingewiesen werden, dass sich diese Aussage an den Erfordernissen der hier verwendeten *FUBRAD*-Parametrisierung orientiert und nicht eins zu eins übertragbar auf andere Modelle ist.

Für eine realistische Repräsentation des auroralen Forcings in Klima-Chemie-Modellen wird derzeit auf Basis der Ergebnisse in WP2 (M2-3) empfohlen, „medium-top“-Modelle mit der in *CMIP6* empfohlenen, von uns getesteten Parametrisierung zu verwenden. „high-top“-Modelle, die auch die Quellregion des auroralen NO_y umfassen, sind eigentlich zu bevorzugen, benötigen aber deutliche Verbesserungen in der Beschreibung der Schwerewellenbeschleunigung, um das aurorale Forcing nicht nur qualitativ, sondern auch quantitativ realistisch zu beschreiben.

M4-5–M4-7 transiente Simulationen Für die transienten, gekoppelten Simulationen im Rahmen von WP4 wurde von den Projektpartnern gemeinsam beschlossen, diese Modellexperimente mit Ausnahme des solaren Antriebs gem. dem *CMIP5*-Protokoll für *historical*-Experimente (1850-2004) und fortgesetzt nach *RCP8.5* (2005-2099) durchzuführen. Das bedeutet, dass die Antriebe (z.B. Konzentrationen von Treibhausgasen, Aerosolen und ozonzerstörenden Substanzen, Landnutzung) den jeweiligen Vorgaben entsprechen. Diese Entscheidung beruhte auf der umfangreichen Verfügbarkeit und bereits fertigen Modellimplementierung, sowie der Annahme, dass für *CMIP6* keine signifikanten Änderungen bei den meisten Antrieben zu erwarten sind bis auf die längere Verfügbarkeit der Daten. Die Entscheidung, das Zukunftsszenario *RCP8.5* zu verwenden, basiert auf zwei Gründen: (i) die beobachtete Entwicklung der Treibhausgaskonzentrationen im Zeitraum seit 2005 (Start der Zukunftsszenarien in *CMIP5*) entspricht bisher am ehesten diesem „worst-case“-Szenario; (ii) ein besonderes Forschungsinteresse besteht darin, wie sich der solare Einfluss zu einem stark anthropogen beeinflussten Klima verhält.

Für den solaren Antrieb hingegen wurde entschieden, der in *ROMIC-SOLIC* und *SOLARIS-HEPPA* erarbeiteten Empfehlung für *CMIP6* zu folgen und die entsprechenden Antriebsdatensätze für TSI, SSI und Kp- bzw. Ap-Index (letztere als Grundlage

der Parametrisierungen des Auroraeffektes) als Basis des Antriebs der drei transienten Experimente in WP4 zu verwenden. Im Sinne des beabsichtigten Effekts, dass jeweils ein Experiment nur den „top-down“- bzw. „bottom-up“-Mechanismus beinhaltet, während das dritte Experiment der gesamten solaren Variabilität unterworfen ist, wurden die Antriebe wie folgt definiert und aufbereitet:

fulltransient volle Variabilität von TSI, SSI und Ap- bzw. Kp-Index wie in der Empfehlung für *CMIP6* für den Zeitraum 1850-2099 vorgegeben

bottomup solare Strahlung variiert nur bzgl. TSI bzw. SSI im Spektralbereich $351 \text{ nm} \leq \lambda \leq 5000 \text{ nm}$ (sichtbar und nahes Infrarot); restl. Spektralbereiche und F10.7cm-Index (als Grundlage der EUV-Parametrisierung in *CESM1(WACCM)*), sowie Ap- bzw. Kp-Index (Aurora-Param.) konstant gemäß *CMIP6*-Empfehlung für *preindustrial-control*-Experimente

topdown Variabilität von Ap- bzw. Kp-Index (Aurora-Param.) und F10.7cm-Index (EUV-Param.) sowie solarer Strahlung im Spektralbereich $\lambda \leq 351 \text{ nm}$ (UV); restl. Spektralbereiche bzw. TSI konstant gemäß *CMIP6*-Empfehlung für *preindustrial-control*-Experimente

Alle drei Experimente mit *CESM1(WACCM)* wurden erfolgreich aufgesetzt und abgeschlossen, die entsprechenden *EMAC*-Simulationen stehen zum Zeitpunkt der Berichtserstellung kurz vor dem Abschluss. Vor dem Start der transienten Simulationen war für *EMAC* eine, in diesem Umfang nicht eingeplante, lange Gleichgewichtssimulation unter vorindustriellen Bedingungen erforderlich, um mit einem reduzierten TSI von $1361,5 \text{ Wm}^{-2}$ einen stabilen Zustand in der gekoppelten Atmosphären-Ozean Modellversion zu erreichen. Auf Basis der *CESM1(WACCM)*-Ergebnisse und des jeweiligen Zwischenstands der *EMAC*-Simulationen sind bereits umfassende Analysen erfolgt (siehe folgender Abschn.), so dass nach Abschluss der noch laufenden Simulationen eine nahtlose Aufbereitung für eine avisierte entsprechende wissenschaftliche Veröffentlichung möglich ist (Kruschke et al., in Planung).

M4-8 Quantitative Analyse des bottom-up- und top-down-Mechanismus in den Simulationen aus M4-5–M4-7 In den vergangenen Jahren wurden entscheidende Fortschritte bei der realistischen Simulation regionaler Klimaauswirkungen solarer Variabilität erzielt (z.B. Gray et al., 2013; Scaife et al., 2013; Thieblemont et al., 2015). Welche Rolle dabei aber jeweils der sog. „top-down“- bzw. „bottom-up“-Mechanismus spielt, konnte bisher nicht quantitativ beantwortet werden. Diese Fragestellung steht im Zentrum der Arbeiten in WP4.

Zu diesem Zweck wurden die drei in M4-5–M4-7 erläuterten, transienten Modellexperimente durchgeführt und ausgewertet. Exemplarisch zeigt Abb. 10 die daraus abgeleiteten mittleren Differenzen der Jahresmitteltemperatur in 2 m Höhe. Es zeigt sich sehr deutlich, dass „top-down“- und „bottom-up“-Mechanismus oberflächennahe Klimasignale von ähnlicher Größenordnung erzeugen. Klar ersichtlich ist aber auch, dass die Auswirkungen voller solarer Variabilität (siehe *fulltransient* in Abb. 10a) für die allermeisten Regionen

nicht einfach als Superposition der Signale der einzeln wirkenden Mechanismen betrachtet werden kann. Dies ist eine neue Erkenntnis im Vergleich zu bisherigen Studien (z.B. Meehl et al., 2009). Für den Pazifikraum produziert der „top-down“-Mechanismus gem. *CESM1(WACCM)* Temperatursignale, die jenen als Resultat voller solarer Variabilität deutlich mehr ähneln, als die des „bottom-up“-Mechanismus. Für andere Regionen der Welt ist dies weniger offensichtlich. Ein Vergleich mit den *EMAC*-Ergebnissen ist derzeit nur unter Vorbehalt möglich, da die hier gezeigten Auswertungen noch beschränkt hinsichtlich des Simulationszeitraums (nur 4 solare Zyklen für *EMAC*, gegenüber 22 Zyklen für *CESM1(WACCM)*) sind. Qualitativ erscheinen die *EMAC*-Signale im Pazifikraum für volle solare Variabilität und für den „bottom-up“-Mechanismus jenen aus den *CESM1(WACCM)*-Simulationen zu ähneln. Eine finale quantitative Beurteilung steht zum Zeitpunkt der Berichtserstellung noch aus, wird aber zeitnah nach Beendigung der *EMAC*-Simulationen abgeschlossen und für eine Veröffentlichung aufbereitet (Kruschke et al., in Planung).

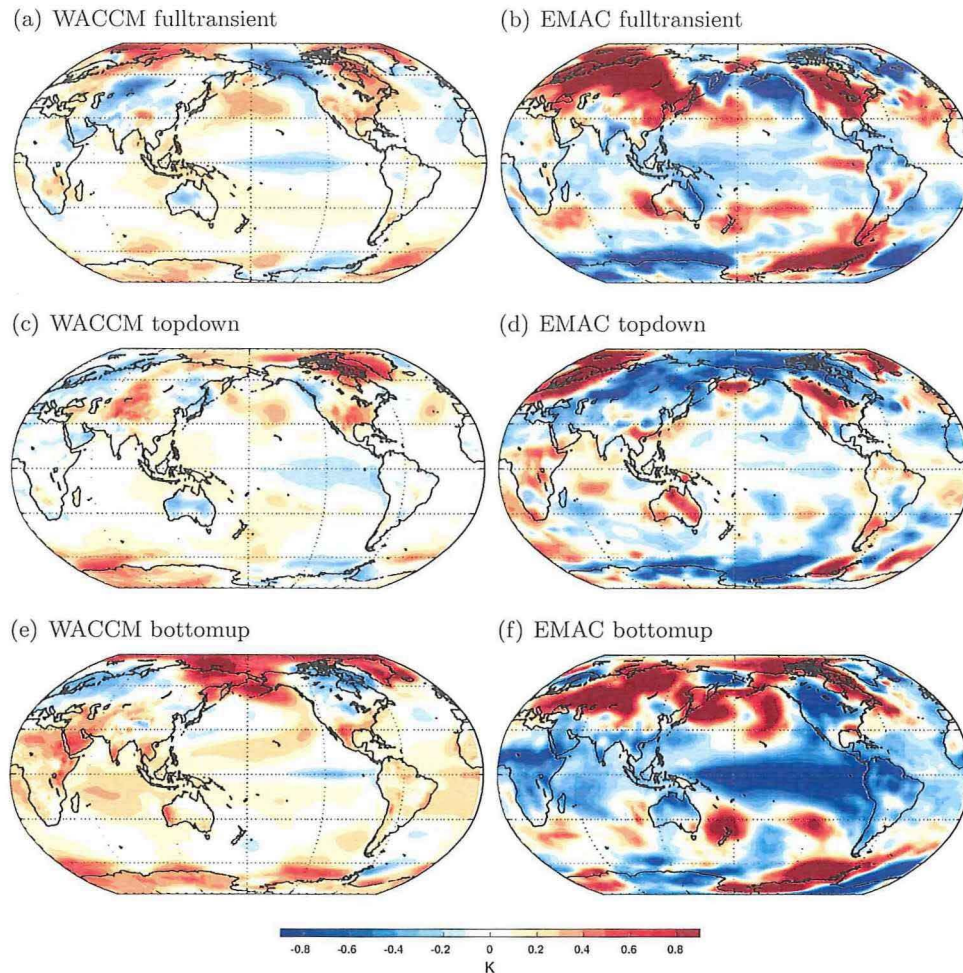


Abbildung 10: Mittlere Differenz der 2m-Temperatur zwischen Jahren solaren Maximums und solaren Minimums aus den drei transienten Simulationen (M4-5 bis M4-7) gem. *CESM1(WACCM)* (links; Simulationszeitraum 1850-2099, 22 solare Zyklen) und *EMAC* (rechts; Simulationszeitraum 1850-1900, 4 solare Zyklen, deren Aussagekraft aufgrund der Kürze des bisher zur Verfügung stehenden Simulationszeitraums eingeschränkt ist.).

2.2 Wichtigste Positionen des zahlenmäßigen Nachweises

Die für *ROMIC-SOLIC* verwendeten Mittel der beteiligten Verbundpartner GEOMAR und KIT bewegen sich im Rahmen der Bewilligungen. Dies gilt für die einzelnen Positionen (Personal-, Verwaltungs- und Reisekosten) und entsprechend auch für die Gesamtkosten. Die Ausgaben des Verbundpartners FUB für Personal sind höher ausgefallen als die bewilligten Personalmittel. Diese höheren Ausgaben für Personal konnten nur teilweise durch geringere Kosten bei Dienstreisen ausgeglichen werden. Weitergehende, diesbezügliche Informationen sind den Erfolgskontrollberichten der einzelnen Verbundpartner zu entnehmen.

Alle Simulationen und Analysen wurden auf Höchstleistungsrechnern des *Deutschen Klimarechenzentrums* (DKRZ), des *Norddeutschen Verbunds für Hoch- und Höchstleistungsrechnen* (HLRN), der *Christian-Albrechts-Universität zu Kiel* (CAU), auf den vom *Steinbuch Centre for Computing* des *Karlsruher Instituts für Technologie* betriebenen Hochleistungsrechnern *BWUniCluster* und *ForHLR2* oder auf hauseigenen Servern der Projektpartner durchgeführt und haben daher keine zusätzlichen Kosten verursacht.

2.3 Notwendigkeit und Angemessenheit der geleisteten Arbeit

Die im Rahmen von *ROMIC-SOLIC* erarbeiteten wissenschaftlichen Erkenntnisse besitzen große Bedeutung für die Forschung zum solaren Einfluss auf das Klima, da sie diesbezügliche Resultate um eine systematische, quantitative Analyse der Unsicherheiten im Kontext der Modellunterschiede und, erstmals überhaupt in dieser Qualität, unterschiedlicher verfügbarer Strahlungsantriebsdatensätze ergänzt. Auch der quantitative Vergleich von Effekten solarer Strahlungs- und Partikelniederschlagsvariabilität deckt eine bisher existierende Lücke im Stand der Forschung ab. Die Aufbereitung und Bereitstellung eines solaren Antriebsdatensatzes für (Chemie-)Klimamodellsimulationen (in Zusammenarbeit mit internationalen Partnern der *SOLARIS-HEPPA*-Initiative stellt einen essentiellen Beitrag für eine fortschreitende Konsistenz von Experimenten im Rahmen von *CMIP6* hinsichtlich des solaren Antriebs dar.

Die Arbeiten hätten ohne die BMBF-Zuwendung nicht durchgeführt werden können. Der Umfang der geleisteten Arbeiten war angemessen, um die Projektziele zu erreichen.

2.4 Voraussichtlicher Nutzen, insbesondere Verwertbarkeit des Ergebnisses im Sinne des fortgeschriebenen Verwertungsplans

Der u.a. im Rahmen von *ROMIC-SOLIC* aufbereitete Datensatz für den solaren Antrieb von (Chemie-)Klimamodellsimulationen ist offiziell zur Verwendung von Experimenten im Zusammenhang mit *CMIP6* empfohlen. Ebenfalls wird in *CMIP6* zum ersten Mal empfohlen, den auroralen Beitrag des solaren Antriebes mit zu berücksichtigen, und die von uns getestete Parametrisierung wird für zukünftige Modellstudien und Untersuchungen zur Verfügung gestellt.

Damit manifestiert sich der im Verwertungsplan anvisierte Nutzen fortschreitender Konsistenz und damit einem erhöhten Potential an Wissenszuwachs hinsichtlich natürlicher, dekadischer Klimavariabilität solaren Ursprungs.

Während in *SOLIC* das bessere Verständnis dieser solar induzierten, natürlichen Variabilität im Vordergrund stand, könnte man zukünftig, beispielsweise in einer wünschenswerten nächsten Phase der Fördermaßnahme *ROMIC*, den Fokus auf den quantitativen Vergleich anthropogen und natürlich verursachter dekadischer Klimavariabilität sowie der Quantifizierung der dekadischen Vorhersagegüte, die sich aus solar induzierten Signalen ergibt, legen.

Die darüber hinaus gewonnenen wissenschaftlichen Erkenntnisse bzgl. der Unsicherheiten solar induzierter Klimasignale, gerade auch im Vergleich von Strahlungs- und Teilcheneffekten, aber auch im Vergleich zu modellinduzierten Unsicherheiten leisten ebenfalls ganz im Sinne des Verwertungsplans wichtige Beiträge zur Zusammenführung bisheriger Partikulärerkenntnisse und Einordnung uneinheitlicher oder zum Teil scheinbar widersprüchlicher Ergebnisse.

Neue Erkenntnisse von dritter Seite (siehe Abschn. 2.5) bzgl. signifikanter Modellverbesserungen von *CESM1(WACCM)* motivierten uns, kurz vor Projektende zusätzliche transiente Simulationen, analog zu jenen aus M4-5–M4-7, zu starten, die diese Modellverbesserungen beinhalten. Damit werden die daraus resultierenden Ergebnisse im Anschluss an *SOLIC* zusätzlich nutzbar sein. Die zu analysierende Frage wird dann sein, ob die signifikante Änderung des klimatologischen Zustands von Bedeutung für die Signale ist, die durch die solare Variabilität induziert werden.

2.5 Während der Durchführung des Vorhabens dem ZE bekannt gewordener Fortschritt auf dem Gebiet des Vorhabens bei anderen Stellen

Im Vorfeld des verzögerten Projektstarts von *SOLIC* wurden Ergebnisse zu drei in 2015 veröffentlichten Studien erarbeitet, die von Relevanz für die GEOMAR-Aktivitäten in *SOLIC* (insbes. M4-2 und M4-3) waren. K. Matthes war an allen drei Studien beteiligt. Diese drei Studien befassen sich mit den solar induzierten Signalen in *CMIP5*-Modellsimulationen für den aktuellen IPCC-Bericht (IPCC, 2013). Diese Auswertungen wurden im Rahmen des *WCRP/SPARC-SOLARIS-HEPPA*-Projektes unter dem Namen „SolarMIP“ durchgeführt:

Die Studie von Hood et al. (2015) zeigt, dass das auch in *SOLIC* am GEOMAR zum Einsatz kommende Modell *CESM1(WACCM)* eins von drei der untersuchten sechs Modelle ist, dessen Simulationsergebnisse in guter Übereinstimmung mit Beobachtungen stehen. Diese gute Übereinstimmung wird vor allem auf den gut aufgelösten kurzwelligen Strahlungscode sowie die interaktive Berechnung des solaren Ozonsignals zurückgeführt.

Die Arbeiten von Mitchell et al. (2015) und Misios et al. (2016) beschäftigen sich mit dem vertikalen Transfer des solaren Klimasignals von der Stratosphäre bis zum Erdboden und dem Ozean. Dabei steht bei Mitchell et al. (2015) die abwärts gerichtete Prozesskette („top-down“) im Vordergrund, also der stratosphärische Einfluss auf die Troposphäre, während Misios et al. (2016) vor allem den aufwärts gerichteten („bottom-up“) Transfer

in Form von solar induzierten ozeanischen Signalen, die die darüber befindliche Atmosphäre wiederum beeinflussen, untersuchen. Mitchell et al. (2015) zeigen u.a., dass jene *CMIP5*-Modelle, die die komplette Stratosphäre beinhalten („high-top“-Modelle), die aus Beobachtungen bekannte (verzögerte) Reaktion der unteren Troposphäre im Nordatlantikraum räumlich umfassender simulieren können als weniger hoch reichende Modelle (low-top-Modelle). Die Studie von Misios et al. (2016) zeigt für das *CMIP5*-Multi-Modell-Ensemble, dass Oberflächentemperaturanomalien generell positiv mit dem solaren Zyklus korrelieren, wenn auch um ein bis zwei Jahre verzögert, mit den stärksten Anomalien im westlichen Äquatorialpazifik und der Arktis. Sie weisen aber auch explizit darauf hin, dass einige Modelle, darunter das in *SOLIC* verwendete *CESM1(WACCM)*, eine Abkühlung im Äquatorialpazifik als Folge solar verstärkter Einstrahlung aufweisen, was möglicherweise als Ergebnis von „top-down“-Prozessen interpretiert werden kann. In 2016 wurde der *NRLSSI2*-Datensatz durch Coddington et al. veröffentlicht. Dabei handelt es sich um eine Rekonstruktion spektraler solarer Einstrahlung, die dem *SOLIC*-Projekt bereits frühzeitig zur Verfügung gestellt wurde und somit vollwertig für alle durchgeführten Arbeiten und Analysen verwendet werden konnte.

Funke et al. veröffentlichte 2016 eine auf MIPAS-Messungen basierende Parametrisierung für den auroralen Einfluss in „Medium-top“-Modellen, die dem *SOLIC*-Projekt ebenfalls bereits frühzeitig zur Verfügung gestellt wurde. Diese stellt eine parallele Entwicklung zu der von den Projektpartnern des KIT entwickelten, auf Modellstudien basierenden Parametrisierung, dar. Beide Parametrisierungen wurden vom KIT anhand von *EMAC*-Modellstudien getestet und im weiteren Verlauf des Projektes verwendet (siehe Abschn. 2.1.4, M2-2).

Die Studie von Dunstone et al. (2016) gibt einen ersten konkreten Hinweis auf die Bedeutung solar induzierter Signale für erfolgreiche Klimavorhersagen auf interannualer Zeitskala. Genau diese Bedeutung stellt einen Kernpunkt der Motivation der Arbeiten in *SOLIC* dar.

Smith et al. (2015) konnten zeigen, dass zwei von ihnen eingeführte Modelländerungen die Klimatologie von *CESM1(WACCM)* signifikant verbessern können: (i) eine Verringerung der Wärmeproduktion durch dissipierende Schwerewellen führt zu einer kühleren und damit realistischeren Temperatur der Mesosphäre; (ii) eine Verringerung der turbulenten Prandtl-Zahl führt zu einer verbesserten vertikalen Temperaturdiffusion (und damit einer zusätzlichen Abkühlung der Mesosphäre) und einem verbesserten vertikalen Transport von Spurengasen. Insbesondere diese zweite Änderung war für *SOLIC* vor dem Hintergrund des durch Auroraeffekte produzierten NO_y interessant. Die entsprechenden Modelländerungen wurden dem GEOMAR zur Verfügung gestellt und für die Simulationen in M3-6, aber auch für zusätzliche Simulationen zu M4-5–M4-7 (siehe unten) genutzt.

Garcia et al. (2016) haben eine Arbeit veröffentlicht, die zeigt, wie sie mit einer Modifikation des vom GEOMAR im Rahmen von *SOLIC* genutzten Modells *CESM1(WACCM)*, die Repräsentation des südhemisphärischen Polarwirbels deutlich verbessern konnten. Dieser war bisher über alle Modellversionen hinweg deutlich zu stark und stabil ausgeprägt. Die entsprechenden Modelländerungen wurden dem GEOMAR von den Autoren dieser Studie zur Verfügung gestellt, so dass kurz vor Projektende

zusätzliche transiente Simulationen, analog zu jenen aus M4-5–M4-7, gestartet wurden, die diese Modellmodifikationen, und die aus Smith et al. (2015), beinhalten. Damit werden die daraus resultierenden Ergebnisse im Anschluss an *SOLIC* zusätzlich nutzbar sein. Die zu analysierende Frage wird dann sein, ob die signifikante Änderung des klimatologischen Zustands von Bedeutung für die Signale ist, die durch die solare Variabilität induziert werden.

2.6 Erfolgte oder geplante Veröffentlichungen des Ergebnisses nach Nr. 11

Erfolgte Veröffentlichungen

Matthes, K., B. Funke, M.E. Anderson, L. Barnard, J. Beer, P. Charbonneau, M.A. Clilverd, T. Dudok de Wit, M. Haberleiter, A. Hendry, C.H. Jackman, M. Kretschmar, T. Kruschke, M. Kunze, U. Langematz, D.R. Marsh, A. Maycock, S. Misios, C.J. Rodger, A.A. Scaife, A. Seppälä, M. Shangguan, M. Sinnhuber, K. Tourpali, I. Usoskin, M. van de Kamp, P.T. Verronen und S. Versick: Solar forcing for CMIP6 (v3.2). *Geosci. Model Dev.*, 10, 2247–2303, DOI: 10.5194/gmd-10-2247-2017, 2017

Sinnhuber, M., U. Berger, B. Funke, H. Nieder, T. Reddmann, G. Stiller, S. Versick, T. von Clarmann und J.M. Wissing: NO_y production, ozone loss and changes in net radiative heating due to energetic particle precipitation in 2002–2010, *Atmos. Chem. Phys. Discuss.*, doi: 10.5194/acp-2017-514, in review, 2017

Geplante Veröffentlichungen

Kunze, M., T. Kruschke, U. Langematz und K. Matthes: Quantifying uncertainties of climate signals related to the 11 year solar cycle – Part I: Annual mean response in Heating Rates, Temperature and Ozone. In Vorbereitung für *Atmos. Chem. Phys.*

Kushnir, Y., A. A. Scaife, R. Arritt, G. Balsamo, G. Boer, D. Carlson, F. Doblas-Reyes, E. Hawkins, M. Kimoto, A. Kumar, D. Matei, K. Matthes, W. A. Müller, T. O’Kane, J. Perlwitz, S. Power, M. Raphael, A. Shimpou, D. Smith, M. Tuma and M. Sparrow: Near-Term Climate Prediction. In Vorbereitung für *Perspectives for Nature Climate Change*

Kruschke, T., M. Kunze, K. Matthes, M. Sinnhuber, U. Langematz und S. Wahl: Quantifying uncertainties of climate signals related to the 11 year solar cycle – Part II: Dynamical impacts of irradiance and auroral forcing. In Vorbereitung für *Atmos. Chem. Phys.*

Sinnhuber, M., T. Kruschke, M. Kunze und S. Versick: Auroral forcing from the lower thermosphere to the surface in three chemistry-climate models. Geplant.

Kunze, M., U. Langematz und T. Reddmann: On identifying the minimum spectral resolution to model the 11-year solar cycle response in global models. Geplant.

Kruschke, T., K. Matthes, M. Kunze, U. Langematz und S. Wahl: A quantitative comparison of bottom-up and top-down solar influence on climate. Geplant

Konferenzbeiträge

- Kunze et al. (2017): Quantifying uncertainties of climate signals related to the 11 year solar cycle. *7th Annual EMAC Symposium*, Mainz (D), 26.–28.06.2017
- Kruschke et al. (2016): The influence of different spectral solar irradiance reconstructions on climate in two chemistry-climate models. *Trends-Workshop 2016*, Kühlungsborn (D), 19.–23.09.2016
- Kunze et al. (2016): Effects of different spectral solar irradiance datasets in the CCMs EMAC and WACCM/ Pt.II: a recent update of RAD/FUBRAD. *6th Annual EMAC Symposium*, Oberpfaffenhofen (D), 29.06–01.07.2016
- Sinnhuber et al.: The impact of geomagnetic activity on the atmosphere: From satellite observations to global models, eingeladener Vortrag, *Frühjahrstagung der Deutschen Physikalischen Gesellschaft (DPG)*, Bremen (D), 03.2017
- Matthes et al. (2017): SOLIC: Quantifizierung von Unsicherheiten in der solaren Klimavariabilität Aktueller Projektstand. *4. ROMIC-Jahrestreffen*, Kühlungsborn (D), 11.–12.05.2017
- Matthes et al. (2016): SOLARIS-HEPPA Report, *WCRP-SPARC/SGG Meeting*, Berlin (D), 01.11.2016
- Matthes et al. (2016): Solar Variability and Climate Predictability, *Regional WCRP-SPARC Workshop*, Berlin (D), 31.10.–01.11.2016
- Kunze et al. (2016): Effects of different spectral solar irradiance datasets on the chemistry and dynamics in the CCMs EMAC and WACCM. *HEPPA-SOLARIS Workshop 2016*, Helsinki (FIN), 13.–17.06.2016
- Nieder und Sinnhuber: Solar particle impact on the middle atmosphere: results of global model studies, *HEPPA-SOLARIS workshop*, Helsinki (FIN), 06.2016.
- Versick et al.: Tests of a parameterization for auroral forcing for CMIP6 simulations, *HEPPA-SOLARIS workshop*, Helsinki (FIN), 06.2016.
- Matthes et al. (2016): Solar Forcing for CMIP6: Part I. *HEPPA-SOLARIS-Workshop*, Helsinki (FIN), 13.–17.06.2016
- Matthes et al. (2016): SOLIC: Quantifizierung von Unsicherheiten in der solaren Klimavariabilität Aktueller Projektstand. *3. ROMIC-Jahrestreffen*, Kühlungsborn (D), 02.–03.05.2016
- Kruschke et al. (2016): Climate variability related to the 11 year solar cycle as represented in different spectral solar irradiance reconstructions. *European Geosciences Union General Assembly 2016*, Wien (AUT), 17.–22.04.2016
- Versick et al.: Tests of a parameterization for auroral forcing for CMIP6 simulations, *European Geosciences Union General Assembly*, Wien (AUT), 04.2016.
- Kruschke et al. (2016): Der Einfluss unterschiedlicher solarer Antriebsdatensätze auf das solare Klimasignal in CESM1(WACCM). *DACH-Tagung* (Fach- und Fortbildungstagung für Meteorologie im deutschsprachigen Raum), Berlin (D), 14.–18.03.2016

- Nieder und Sinnhuber: Solar particle impact on the middle atmosphere: results of global model studies, *Gemeinsame Jahrestagung der Deutschen Geophysikalischen Gesellschaft mit der Sektion "Extraterrestrische Physik" der DPG*, Münster (D), 03.2016.
- Matthes et al. (2015): SOLARIS-HEPPA Report 2015, *WCRP/SPARC-SSG-Meeting*, Boulder, CO (USA), 11.2015
- Kruschke et al. (2015): The impact of different solar forcing datasets on the solar climate signal in CESM1(WACCM). *SOLARIS-HEPPA working group meeting*, Boulder, CO (USA), 04.–06.11.2015
- Kunze et al. (2015): Effects of different spectral solar irradiance datasets on the atmospheric solar signal in EMAC. *SOLARIS-HEPPA working group meeting*, Boulder, CO (USA), 04.–06.11.2015
- Nieder et al.: Geomagnetic forcing in three global models in 2002—2010: Quantification and model-observation intercomparison, *HEPPA-SOLARIS working group meeting*, Boulder, CO (USA), 04.–06.11.2015.
- Versick et al.: Preliminary tests of a parameterization for auroral forcing in the CCM EMAC, *HEPPA-SOLARIS working group meeting*, Boulder, CO (USA), 04.–06.11.2015.
- Matthes et al. (2015): SOLIC – Quantification of Uncertainties in SOLar Induced Climate Variability. *RAISE-Meeting*, Boulder, CO (USA), 03.11.2015
- Sinnhuber et al.: Direct and indirect particle effects in the 3dCTM, 2002—2010: Quantification and model-observation intercomparison, *RAISE Meeting*, Boulder, CO (USA), 03.11.2015.
- Kunze et al. (2015): Offline version of submodel RAD: application to solar variability studies. *5th Annual EMAC Symposium*, Jülich (D), 16.–18.06.2015
- Ayarzaguena et al. (2015): The impact of different solar forcing data sets on the atmospheric radiation budget, poster presentation. *26. Generalversammlung der International Union of Geodesy and Geophysics*, Prag (TCH), 22.06.–02.07.2015
- Kruschke et al. (2015): The impact of different solar forcing datasets on the solar signal in climate. *26. Generalversammlung der International Union of Geodesy and Geophysics*, Prag (TCH), 22.06.–02.07.2015
- Matthes et al. (2015): SOLIC – Quantifizierung von Unsicherheiten in der solaren Klimavariabilität. *2. ROMIC-Jahrestreffen*, Kühlungsborn (D), 28.–29.05.2015
- Nieder und Sinnhuber: Solar influence on the MLT region: NO_x production studies and parameterizations, *Frühjahrstagung der Deutschen Physikalischen Gesellschaft (DPG)*, Wuppertal (D), 03.2015.
- Nieder und Sinnhuber: Solar influence on the MLT region: NO_x production studies and parameterizations, *TOSCA-COST Meeting*, Kiel (D), 03.2015.
- Matthes et al. (2015): Solar Variability and SolarMIP, Joined MiKlip/SPECS-Meeting on Decadal Climate Prediction, Offenbach (D), 02.2015

Matthes et al. (2015): SOLARIS-HEPPA Report WCRP/SPARC-SSG-Meeting, Granada (ESP), 01.2015

Matthes et al. (2014): SOLIC - Quantification of Uncertainties in SOLar Induced Climate Variability, 1. *ROMIC-Jahrestreffen*, Kühlungsborn (D)

Literatur

Berger, U.: Modeling of middle atmosphere dynamics with LIMA, JASTP, S. 1170–1200, 2008.

Brion, J., Chakir, A., Charbonnier, J., Daumont, D., Parisse, C., und Malicet, J.: No Title, J. Atmos. Chem., 30, 291–299, doi: 10.1023/A:1006036924364, URL <http://link.springer.com/10.1023/A:1006036924364>, 1998.

Coddington, O., Lean, J. L., Pilewskie, P., Snow, M., und Lindholm, D.: A Solar Irradiance Climate Data Record, Bull. Amer. Meteor. Soc., 97, 1265–1282, doi: 10.1175/BAMS-D-14-00265.1, 2016.

Collins, W. D.: A global signature of enhanced shortwave absorption by clouds, J. Geophys. Res., 103, 31 669–31 679, 1998.

Dietmüller, S., Jöckel, P., Tost, H., Kunze, M., Gellhorn, C., Brinkop, S., Frömming, C., Ponater, M., Steil, B., Lauer, A., und Hendricks, J.: A new radiation infrastructure for the Modular Earth Submodel System (MESSy, based on version 2.51), Geosci. Model Dev., 9, 2209–2222, doi: 10.5194/gmd-9-2209-2016, URL <http://www.geosci-model-dev.net/9/2209/2016/>, 2016.

Dunstone, N., Smith, D., Scaife, A., Hermanson, L., Eade, R., Robinson, N., Andrews, M., und Knight, J.: Skilful predictions of the winter North Atlantic Oscillation one year ahead, Nature Geosci., advanced online publication, –, URL <http://dx.doi.org/10.1038/ngeo2824>, 2016.

Ermolli, I., Matthes, K., Dudok de Wit, T., Krivova, N. A., Tourpali, K., Weber, M., Unruh, Y. C., Gray, L., Langematz, U., Pilewskie, P., Rozanov, E., Schmutz, W., Shapiro, A., Solanki, S. K., und Woods, T. N.: Recent variability of the solar spectral irradiance and its impact on climate modelling, Atmos. Chem. Phys., 13, 3945–3977, doi: 10.5194/acp-13-3945-2013, URL <http://www.atmos-chem-phys.net/13/3945/2013/>, 2013.

Fally, S., Vandaele, A., Carleer, M., Hermans, C., Jenouvrier, A., Mérienne, M.-F., Coquart, B., und Colin, R.: Fourier Transform Spectroscopy of the O₂ Herzberg Bands. III. Absorption Cross Sections of the Collision-Induced Bands and of the Herzberg Continuum, J. Mol. Spectrosc., 204, 10–20, doi: 10.1006/jmsp.2000.8204, URL <http://linkinghub.elsevier.com/retrieve/pii/S0022285200982043>, 2000.

- Fouquart, Y. und Bonnel, B.: Computations of solar heating of the Earth's atmosphere: A new parameterization, *Beitr. Phys. Atmos.*, 53, 35–62, 1980.
- Funke, B., Lopez-Puertas, M., Stiller, G. P., Versick, S., und Clarmann, T. v.: A semi-empirical model for mesospheric and stratospheric NO_y produced by energetic particle precipitation, *ACP*, S. 8667–8693, doi: 10.5194/acp-16-8667-2016, 2016.
- Garcia, R., Smith, A., Kinnison, D., de la Cámara, A., und Murphy, D.: Modification of the gravity wave parameterization in the Whole Atmosphere Community Climate Model: Motivation and results, *J. Atmos. Sci.*, 74, 275–291, doi: 10.1175/JAS-D-16-0104.1, 2016.
- Giorgetta, M. A. und Bengtsson, L.: Potential role of the quasi-biennial oscillation in the stratosphere-troposphere exchange as found in water vapor in general circulation model experiments, *J. Geophys. Res.: Atmos.*, 104, 6003–6019, doi: 10.1029/1998JD200112, URL <http://dx.doi.org/10.1029/1998JD200112>, 1999.
- Gray, L., Scaife, A., Mitchell, D., Osprey, S., Ineson, S., Hardiman, S., Butchart, N., Knight, J., Sutton, R., und Kodera, K.: A Lagged Response to the 11-year Solar Cycle in Observed Winter Atlantic/European Weather Patterns, *J. Geophys. Res.*, 118, 1–16, 2013.
- Gray, L. J., Beer, J., Geller, M., Haigh, J. D., Lockwood, M., Matthes, K., Cubasch, U., Fleitmann, D., Harrison, G., Hood, L., Luterbacher, J., Meehl, G. A., Shindell, D., van Geel, B., und White, W.: Solar influences on climate, *Rev. Geophys.*, 48, doi: 10.1029/2009RG000282, 2010.
- Hagemann, S., Arpe, K., und Roeckner, E.: Evaluation of the Hydrological Cycle in the ECHAM5 Model, *J. Clim.*, 19, 3810–3827, doi: 10.1175/JCLI3831.1, URL <http://journals.ametsoc.org/doi/abs/10.1175/JCLI3831.1>, 2006.
- Hood, L. L., Misios, S., Mitchell, D. M., Rozanov, E., Gray, L. J., Tourpali, K., Matthes, K., Schmidt, H., Chiodo, G., Thiéblemont, R., Shindell, D., und Krivolutsky, A.: Solar signals in CMIP-5 simulations: The ozone response, *Q. J. Roy. Meteorol. Soc.*, 141, 2670–2689, doi: 10.1002/qj.2553, 2015.
- Hurrell, J. W., Holland, M. M., Gent, P. R., Ghan, S., Kay, J. E., Kushner, P. J., Lamarque, J. F., Large, W. G., Lawrence, D., Lindsay, K., Lipscomb, W. H., Long, M. C., Mahowald, N., Marsh, D. R., Neale, R. B., Rasch, P., Vavrus, S., Vertenstein, M., Bader, D., Collins, W. D., Hack, J. J., Kiehl, J., und Marshall, S.: The Community Earth System Model - A Framework for Collaborative Research, *Bull. Amer. Meteor. Soc.*, 94, 1339–1360, doi: 10.1175/BAMS-D-12-00121.1, 2013.
- IPCC: Climate Change 2013: The Physical Science Basis. Contribution of Working Group I to the Fifth Assessment Report of the Intergovernmental Panel on Climate Change, Cambridge Univ. Press, Cambridge, United Kingdom and New York, NY, USA, 2013.

- Jöckel, P., Kerkweg, A., Pozzer, A., Sander, R., Tost, H., Riede, H., Baumgaertner, A., Gromov, S., und Kern, B.: Development cycle 2 of the Modular Earth Submodel System (MESSy2), *Geosci. Model Dev.*, 3, 717–752, doi: 10.5194/gmd-3-717-2010, URL <http://www.geosci-model-dev.net/3/717/2010/>, 2010.
- Jöckel, P., Tost, H., Pozzer, A., Kunze, M., Kirner, O., Brenninkmeijer, C. A. M., Brinkop, S., Cai, D. S., Dyroff, C., Eckstein, J., Frank, F., Garny, H., Gottschaldt, K.-D., Graf, P., Grewe, V., Kerkweg, A., Kern, B., Matthes, S., Mertens, M., Meul, S., Neunaier, M., Nützel, M., Oberländer-Hayn, S., Ruhnke, R., Runde, T., Sander, R., Scharffe, D., und Zahn, A.: Earth System Chemistry integrated Modelling (ESCiMo) with the Modular Earth Submodel System (MESSy) version 2.51, *Geosci. Model Dev.*, 9, 1153–1200, doi: 10.5194/gmd-9-1153-2016, URL <http://www.geosci-model-dev.net/9/1153/2016/>, 2016.
- Jungclauss, J. H., Keenlyside, N., Botzet, M., Haak, H., Luo, J.-J. J., Latif, M., Marotzke, J., Mikolajewicz, U., und Roeckner, E.: Ocean circulation and tropical variability in the coupled model ECHAM5/MPI-OM, *J. Clim.*, 19, 3952–3972, doi: 10.1175/JCLI3827.1, URL <http://journals.ametsoc.org/doi/abs/10.1175/JCLI3827.1>, 2006.
- Kinnison, D. E., Brasseur, G. P., Walters, S., Garcia, R. R., Marsh, D. R., Sassi, F., Harvey, V. L., Randall, C. E., Emmons, L., Lamarque, J. F., Hess, P., Orlando, J. J., Tie, X. X., Randel, W., Pan, L. L., Gettelman, A., Granier, C., Diehl, T., Niemeier, U., und Simmons, A. J.: Sensitivity of chemical tracers to meteorological parameters in the MOZART-3 chemical transport model, *J. Geophys. Res.*, 112, D20302, doi: 10.1029/2006JD007879, 2007.
- Kockarts, G.: Penetration of solar radiation in the Schumann-Runge bands of molecular oxygen: a robust approximation, *Ann. Geophysicae*, 12, 1207–1217, doi: 10.1007/BF03191317, 1994.
- Koppers, G. A. A. und Murtagh, D. P.: Model studies of the influence of O₂ photodissociation parameterizations in the Schumann-Runge bands on ozone related photolysis in the upper atmosphere, *Ann. Geophys.*, 14, 68–79, doi: 10.1007/s00585-996-0068-9, URL <http://www.ann-geophys.net/14/68/1996/>, 1996.
- Krivova, N. A., Vieira, L. E. A., und Solanki, S. K.: Reconstruction of solar spectral irradiance since the Maunder minimum, *J. Geophys. Res.: Space Physics*, 115, doi: 10.1029/2010JA015431, URL <http://dx.doi.org/10.1029/2010JA015431>, 2010.
- Kunze, M., Godolt, M., Langematz, U., Grenfell, J., Hamann-Reinus, A., und Rauer, H.: Investigating the early Earth faint young Sun problem with a general circulation model, *Planet. Space Sci.*, 98, 77–92, doi: 10.1016/j.pss.2013.09.011, planetary evolution and life, 2014.
- Lean, J., Rottman, G., Harder, J., und Kopp, G.: SORCE Contributions to New Understanding of Global Change and Solar Variability, in: *The Solar Radiation and Climate Experiment (SORCE)*, herausgegeben von Rottman, G., Woods, T.,

- und George, V., S. 27–53, Springer New York, doi: 10.1007/0-387-37625-9_3, URL http://dx.doi.org/10.1007/0-387-37625-9_3, 2005.
- Lu, H., Clilverd, M., Seppälä, A., und Hood, L.: Geomagnetic perturbations on stratospheric circulation in late winter and spring, *JGR*, doi: 10.1029/2007JD008915, 2008.
- Malicet, J., Daumont, D., Charbonnier, J., Parisse, C., Chakir, A., und Brion, J.: Ozone UV spectroscopy. II. Absorption cross-sections and temperature dependence, *J. Atmos. Chem.*, 21, 263–273, doi: 10.1007/BF00696758, URL <http://link.springer.com/10.1007/BF00696758>, 1995.
- Marsh, D. R., Mills, M. J., Kinnison, D. E., Lamarque, J.-F., Calvo, N., und Polvani, L. M.: Climate Change from 1850 to 2005 Simulated in CESM1(WACCM), *J. Climate*, 26, 7372–7391, doi: 10.1175/JCLI-D-12-00558.1, 2013.
- Marsland, S., Haak, H., Jungclaus, J., Latif, M., und Röske, F.: The Max-Planck-Institute global ocean/sea ice model with orthogonal curvilinear coordinates, *Ocean Model.*, 5, 91–127, doi: 10.1016/S1463-5003(02)00015-X, URL <http://linkinghub.elsevier.com/retrieve/pii/S146350030200015X>, 2003.
- Matthes, K., Marsh, D. R., Garcia, R. R., Kinnison, D. E., Sassi, F., und Walters, S.: Role of the QBO in modulating the influence of the 11 year solar cycle on the atmosphere using constant forcings, *J. Geophys. Res.*, 115, D18110, doi: 10.1029/2009JD013020, 2010.
- Matthes, K., Funke, B., Andersson, M. E., Barnard, L., Beer, J., Charbonneau, P., Clilverd, M. A., Dudok de Wit, T., Haberreiter, M., Hendry, A., Jackman, C. H., Kretzschmar, M., Kruschke, T., Kunze, M., Langematz, U., Marsh, D. R., Maycock, A. C., Misios, S., Rodger, C. J., Scaife, A. A., Seppälä, A., Shanguan, M., Sinnhuber, M., Tourpali, K., Usoskin, I., van de Kamp, M., Verronen, P. T., und Versick, S.: Solar forcing for CMIP6, GMD, doi: doi:10.5194/gmd-10-2247-2017, 2017.
- Maycock, A. C., Matthes, K., Tegtmeier, S., Thiéblemont, R., und Hood, L.: The representation of solar cycle signals in stratospheric ozone – Part 1: A comparison of recently updated satellite observations, *Atmospheric Chemistry and Physics*, 16, 10 021–10 043, doi: 10.5194/acp-16-10021-2016, URL <https://www.atmos-chem-phys.net/16/10021/2016/>, 2016.
- Maycock, A. C., Matthes, K., Tegtmeier, S., Schmidt, H., Thiéblemont, R., Hood, L., Bekki, S., Deushi, M., Jöckel, P., Kirner, O., Kunze, M., Marchand, M., Marsh, D. R., Michou, M., Revell, L. E., Rozanov, E., Stenke, A., Yamashita, Y., und Yoshida, K.: The representation of solar cycle signals in stratospheric ozone. Part II: Analysis of global models, *Atmospheric Chemistry and Physics Discussions*, 2017, 1–32, doi: 10.5194/acp-2017-477, URL <https://www.atmos-chem-phys-discuss.net/acp-2017-477/>, 2017.

- Meehl, G. A., Arblaster, J. M., Matthes, K., Sassi, F., und van Loon, H.: Amplifying the Pacific Climate System Response to a Small 11-Year Solar Cycle Forcing, *Science*, 325, 1114–1117, doi: 10.1126/science.1172872, 2009.
- Misios, S., Mitchell, D. M., Gray, L. J., Tourpali, K., Matthes, K., Hood, L. L., Schmidt, H., Chiodo, G., Thiéblemont, R., Rozanov, E., und Krivolutsky, A.: Solar signals in CMIP-5 simulations: effects of atmosphere–ocean coupling, *Q. J. Roy. Meteorol. Soc.*, 142, 928–941, doi: 10.1002/qj.2695, 2016.
- Mitchell, D. M., Misios, S., Gray, L. J., Tourpali, K., Matthes, K., Hood, L. L., Schmidt, H., Chiodo, G., Thiéblemont, R., Rozanov, E., Shindell, D., und Krivolutsky, A.: Solar signals in CMIP-5 simulations: the stratospheric pathway, *Q. J. Roy. Meteorol. Soc.*, 141, 2390–2403, doi: 10.1002/qj.2530, 2015.
- Neale, R. B., Richter, J., Park, S., Lauritzen, P. H., Vavrus, S. J., Rasch, P. J., und Zhang, M.: The Mean Climate of the Community Atmosphere Model (CAM4) in Forced SST and Fully Coupled Experiments, *J. Climate*, 26, 5150–5168, doi: 10.1175/jcli-d-12-00236.1, 2013.
- Nieder, H., Winkler, H., Marsh, D. R., und Sinnhuber, M.: NO_x production due to energetic particle precipitation in the MLT region: Results from ion chemistry model studies, *JGR*, S. 2137–2148, doi: 10.1002/2013JA019044, 2014.
- Nissen, K. M., Matthes, K., Langematz, U., und Mayer, B.: Towards a better representation of the solar cycle in general circulation models, *Atmos. Chem. Phys.*, 7, 5391–5400, doi: 10.5194/acp-7-5391-2007, 2007.
- Pozzer, A., Kern, B., Haak, H., Jöckel, P., Kern, B., und Haak, H.: The Atmosphere–Ocean General Circulation Model EMAC-MPIOM, *Geosci. Model Dev.*, 4, 771–784, doi: 10.5194/gmd-4-771-2011, URL <http://www.geosci-model-dev.net/4/771/2011/>, 2011.
- Roeckner, E., Bäuml, G., Bonaventura, L., Brokopf, R., Esch, M., Giorgetta, Hagemann, S., Kirchner, I., Kornblueh, L., Manzini, E., Rhodin, A., Schlese, U., Schulzweida, U., und Tompkins, A.: The atmospheric general circulation model ECHAM5, Part I, *Techn. Ber. No. 349*, Max-Planck-Institut für Meteorologie, Hamburg, 2003.
- Roeckner, E., Brokopf, R., Esch, M., Giorgetta, M., Hagemann, S., Kornblueh, L., Manzini, E., Schlese, U., und Schulzweida, U.: Sensitivity of Simulated Climate to Horizontal and Vertical Resolution in the ECHAM5 Atmosphere Model, *J. Climate*, 19, 3771–3791, doi: 10.1175/JCLI3824.1, 2006.
- Sander, R., Baumgaertner, A., Gromov, S., Harder, H., Jöckel, P., Kerkweg, A., Kubistin, D., Regelin, E., Riede, H., Sandu, A., Taraborrelli, D., Tost, H., und Xie, Z.-Q.: The atmospheric chemistry box model CAABA/MECCA-3.0, *Geosci. Model Dev.*, 4, 373–380, doi: 10.5194/gmd-4-373-2011, URL <http://www.geosci-model-dev.net/4/373/2011/>, 2011a.

- Sander, R., Jöckel, P., Kirner, O., Kunert, A. T., Landgraf, J., und Pozzer, A.: The photolysis module JVAL-14, compatible with the MESSy standard, and the JVal Pre-Processor (JVPP), *Geosci. Model Dev.*, 7, 2653–2662, doi: 10.5194/gmd-7-2653-2014, URL <http://www.geosci-model-dev.net/7/2653/2014/>, 2014.
- Sander, S. P., Abbatt, J., Barker, J. R., Burkholder, J. B., Friedl, R. R., Golden, D. M., Huie, R. E., Kolb, C. E., Kurylo, M. J., Moortgat, G. K., Orkin, V. L., und Wine, P. H.: Chemical Kinetics and Photochemical Data for Use in Atmospheric Studies, *Techn. Ber. Evaluation No. 17*, JPL Publication 10-6, Jet Propulsion Laboratory, Pasadena, URL <http://jpldataeval.jpl.nasa.gov>, 2011b.
- Scaife, A. A., Ineson, S., Knight, J. R., Gray, L., Kodera, K., und Smith, D. M.: A mechanism for lagged North Atlantic climate response to solar variability, *Geophysical Research Letters*, 40, 434–439, doi: 10.1002/grl.50099, 2013.
- Seppälä, A., Lu, H., Clilverd, M., und Rodger, C.: Geomagnetic activity signatures in wintertime stratosphere wind, temperature, and wave response, *JGR*, doi: 10.1029/jgrd.50236, 2013.
- Shine, K. P. und Rickaby, J. A.: Solar radiative heating due to the absorption by ozone, in: *Ozone in the atmosphere*, herausgegeben von Bojkov, R. D. und Fabian, P., S. 597–600, A Deepack Publishing, Hampton, Va, USA, 1989.
- Sinnhuber, M., Nieder, H., und Wieters, N.: Energetic Particle Precipitation and the Chemistry of the Mesosphere/Lower Thermosphere, *Surv. Geophys.*, doi: 10.1007/s10712-9201-3, 2012.
- Sinnhuber, M., Berger, U., Funke, B., Nieder, H., Reddmann, T., Stiller, G., Versick, S., von Clarmann, T., und Wissing, J. M.: ACPD, doi: 10.5194/acp-2017-514, 2017.
- Smith, A. K., López-Puertas, M., Funke, B., García-Comas, M., Mlynarczyk, M. G., und Holt, L. A.: Nighttime ozone variability in the high latitude winter mesosphere, *Journal of Geophysical Research: Atmospheres*, 119, 13,547–13,564, doi: 10.1002/2014JD021987, URL <http://dx.doi.org/10.1002/2014JD021987>, 2014JD021987, 2015.
- Smith, R., Jones, P., Briegleb, B., Bryan, F., Danabasoglu, G., Dennis, J., Dukowicz, J., Eden, C., Fox-Kemper, B., Gent, P., Hecht, M., Jayne, S., Jochum, M., Large, W., Lindsay, K., Maltrud, M., Norton, N., Peacock, S., Vertenstein, M., und Yeager, S.: The Parallel Ocean Program (POP) Reference Manual, *Techn. Ber. LAUR-10-01853*, Los Alamos National Laboratory, URL <http://www.cesm.ucar.edu/models/cesm1.0/pop2/doc/sci/POPRefManual.pdf>, 2010.
- Solomon, S. und Qian, L.: Solar extreme-ultraviolet irradiance for general circulation models, *JGR*, doi: 10.1029/2005JA011160, 2005.
- SPARC CCMVal: SPARC Report No 5 (2010) Chemistry-Climate Model Validation, WCRP-132, WMO/TD-No. 1526, 2010.

- Strobel, D. F.: Parameterization of the atmospheric heating rate from 15 to 120 km due to O₂ and O₃ absorption of solar radiation, *J. Geophys. Res.*, 83, 6225–6230, 1978.
- Thieblemont, R., Matthes, K., Omrani, N.-E., Kodera, K., und Hansen, F.: Solar forcing synchronizes decadal North Atlantic climate variability, *Nature Commun.*, 6, 8268, doi: 10.1038/ncomms9268, 2015.
- Thuillier, G., Floyd, L., Woods, T., Cebula, R., Hilsenrath, E., Hersé, M., und Labs, D.: Solar irradiance reference spectra for two solar active levels, *Adv. Space Res.*, 34, 256–261, doi: 10.1016/j.asr.2002.12.004, *solar Variability and Climate Change*, 2004.
- von Storch, H. und Zwiers, F. W.: *Statistical Analysis in Climate Research*, Cambridge University Press, doi: 10.1017/CBO9780511612336, 1999.
- Wissing, J. und Kallenrode, M.-B.: Atmospheric Ionization Module Osnabruck (AIMOS): A 3-D model to determine atmospheric ionization by energetic charged particles from different populations, *JGR*, doi: 10.1016/j.jastp.2016.04.007, 2009.
- Yeo, K. L., Krivova, N. A., Solanki, S. K., und Glassmeier, K. H.: Reconstruction of total and spectral solar irradiance from 1974 to 2013 based on KPVT, SoHO/MDI, and SDO/HMI observations, *Astron. Astrophys.*, 570, A85, doi: 10.1051/0004-6361/201423628, URL <http://dx.doi.org/10.1051/0004-6361/201423628>, 2014.
- Yoshino, K., Cheung, A.-C., Esmond, J., Parkinson, W., Freeman, D., Guberman, S., Jenouvrier, A., Coquart, B., und Merienne, M.: Improved absorption cross-sections of oxygen in the wavelength region 205–240 nm of the Herzberg continuum, *Planet. Space Sci.*, 36, 1469–1475, doi: 10.1016/0032-0633(88)90012-8, URL <http://linkinghub.elsevier.com/retrieve/pii/0032063388900128>, 1988.